



Aalto-universitetet
Högskolan för
ingenjörsvetenskaper

Hanna Berg

Blandning av väte i naturgas för gasmotorer

Diplomarbete

Vasa 10. november 2015

Övervakare: Professor Martti Larmi

Handledare: Jenny Stegar, DI samt Kaj Portin, DI

Författare Hanna Berg

Titel Blandning av väte i naturgas som bränsle för gasmotorer

Utbildningsprogram Energi- och VVS-teknik

Huvudämne Energiteknik

Kod K3007

Övervakare Professor Martti Larmi

Handledare Diplomingenjör Jenny Stegar samt diplomingenjör Kaj Portin

Datum 10.11.2015

Sidantal 62

Språk Svenska

Sammandrag

Väte-naturgasblandningar analyseras i rapporten som bränsle för gasmotorer. Till rapporten hör planering av tester, utföring av tester och analys av testresultat samt slutsatser.

Blandning av väte i gassystemet kan komma att bli verklighet inom nära framtid, och vätemotorer har redan testats i stor utsträckning. För att kunna använda väteblandningar i förbränningsmotorer bör inverkan på knockning och förbränningsvaraktighet analyseras. Eftersom väte brinner snabbare än metan kommer även blandningarna att brinna snabbare, med risk för ohanterlig knockning eller förtändning.

I rapporten läggs vikt vid planeringen av säkerheten i testningsutrymmet, för att garantera säker operation av motorn under testerna.

Testerna utfördes på Wärtsiläs medelsnabba gasmotorer, en med pilottändning och en med tändstiftständning, där både full och nedsatt last analyserades med varierande mängd väte. Tändningstidpunkten varieras för att analysera när den optimala tidpunkten är för de olika blandningarna. Högsta möjliga andelen väte som kan tilläggas i bränslet på full last var för tändstiftmotorn 28 vol-% på medelhögt kompressionsförhållande och 16 vol-% på motorn med pilottändning på högt kompressionsförhållande. Med lägre kompressionsförhållande kunde mera väte tilläggas, och med 75 % last kunde 60 vol-% väte tilläggas i bränslet. Mera än detta kunde ha körts från knockningssynpunkt, men systemet kunde inte mata högre än detta. Inga justeringar gjordes i motorn vid dessa punkter. Punkterna hade höga NO_x-nivåer, vilket beror på den höga temperaturen i cylindern. När tändningstidpunkten justerades kunde mera väte tilläggas, och NO_x-nivån sjönk. Kolväte-utsläppen minskade, speciellt på tändstiftsmotorn vid höga andelar väte.

Resultaten visar att Wärtsiläs motorer kan köras på relativt hög andel väte om tändningstidpunkten justeras. Utan justering i tändningstidpunkt är trycken och temperaturerna i motorn omöjligt höga och ger upphov till höga NO_x-utsläpp. Vid optimal tändningstidpunkt kommer flera fördelar fram, som lägre kolväte-utsläpp.

Framtida forskningsmöjligheter finns i att köra tester med dessa bränslen på varierande last. För att väte ska kunna tilläggas i gasnätverket för Wärtsiläs del borde ett verktyg för att kontinuerligt analysera inkommande gas till motorn utvecklas, så tändningstidpunkten kan justeras snabbt.

Nyckelord förbränningsmotorer, väte-naturgasblandning, utsläpp, förbränningsvaraktighet



Author Hanna Berg		
Title of thesis Hydrogen blending in gas engines		
Degree programme Energy- and HVAC-technology		
Major Energy technology		Code K3007
Thesis supervisor Martti Larmi, Professor		
Thesis advisors Jenny Stegar, Master of Science and Kaj Portin, Master of Science		
Date 10.11.2015	Number of pages 62	Language Swedish

Abstract

Hydrogen blending in natural gas is analysed as a fuel for gas engines. The report includes test plans, the execution of the tests, analysis of the test results and conclusions.

Blending of hydrogen in natural gas pipelines can become reality in the near future, and pure hydrogen engines have already been tested extensively. To be able to safely use hydrogen blends in a gas engine, the effect on knock and pre-ignition has to be studied. Since the flame propagation speed of hydrogen is much higher than that of methane, the blend will burn faster and at higher temperatures than a pure methane fuel.

One area of focus in the report is security of the test cell to ensure safe operation with the highly explosive fuel during the tests.

The tests were carried out on Wärtsilä 34 medium speed gas engines, one with pilot-ignition and the other with a spark plug. Both full load and part load points were tested with varying amounts of hydrogen. Different compression ratios were tested as well. The ignition timing was changed to find the optimal time of ignition. The maximum amount of hydrogen added to the fuel at full load was for the spark ignited engine 28 vol-% at medium compression ratio and for the engine with pilot-ignition the maximum of 16 vol-% hydrogen was added at a high compression ratio. These points were run without adjustments to the engine, with high temperatures, pressures and NO_x-levels. On lower compression ratio the maximum amount was increased, and at part load, 75 %, up to 60 vol-% hydrogen was added. The limiting factor was the supply system of hydrogen, not knock, indicating that even more could have been added. With adjustments to the engines the NO_x-levels were decreased. The hydro carbon-emissions were decreased in the emissions.

The results show that relatively high levels of hydrogen can be added to the engines, but that the ignition timing should be adjusted according to the hydrogen level to avoid high NO_x-emissions. If an online tool for analysing the composition of the gas was developed, the engines of Wärtsilä could use gas with varying amount of hydrogen as well.

Keywords Internal combustion engines, hydrogen blending, emissions, combustion duration

Tack

Att skriva detta arbete har varit enormt intressant, men på samma gång en lång och krävande process. Jag har varit genuint intresserad av att få reda på mera information om mitt ämne och få reda på resultaten av de tester som har körts, vilket har underlättat min inläring väldigt. Både mitt team på Wärtsilä och mina medhjälpare på Aalto har varit intresserade av ämnet och har hjälpt mig otaliga gånger, med både stora och små frågor.

På Wärtsilä vill jag speciellt tacka Kaj Portin för förtroendet att få skriva detta arbete, Jenny Stegar för ypperlig handledning i alla möjliga frågor, och alla kollegor för kafferastdiskussioner som flera gånger än en har gett insikter jag aldrig kunde få själv, och den expertis som har delats med mig under det gångna året.

På Aaltouniversitetet vill jag speciellt tacka min professor Martti Larmi, som visat ett stöd och engagemang som jag inte kunde ha klarat mig utan. Tack också till min assisterade professor Ville Vuorinen samt Armin.

Sist men inte minst vill jag tacka alla de som har stött mig på andra sätt, speciellt min familj, mina vänner och min pojkvän.

Hanna Berg

Vasa, 10.11.2015

Innehållsförteckning

1. Introduktion	1
2. Väte.....	4
2.1 Tidigare forskning inom väteinblandning i naturgas	4
2.2 Grunderna om väte	7
2.3 Transport och förvaring.....	8
2.4 Väteförsprödning.....	9
2.5 Väte som elnätsstabilisator.....	9
2.6 Säkerhet.....	10
3. Förberedelser	12
3.1 Blandstation.....	12
3.2 Testcell	14
3.3 Säkerhet.....	18
4. Förbränningsmotorer	21
4.1 Gasmotorer	21
4.2 Wärtsilä-motorer	22
4.3 Knackning och förtändning.....	23
4.4 Timing	25
4.5 Lufttillförsel/lambda	26
4.6 Miller.....	28
4.7 Värmefrigöringstakt	28
4.8 Flamhastighet	29
4.9 Metantal.....	31
4.10 Avgaser	32
4.11 Wärtsilä 34 DF och SG	34
4.12 Bränsle.....	35

5. Tester	37
5.1 Hypoteser	37
5.2 Planerade tester	37
5.3 Utfört test	40
6. Testresultat	45
7. Diskussion	54
8. Framtida utsikter.....	57
Referensförteckning.....	59

Nomenklatur

HCNG	-	Komprimerad naturgas-väteblandningar
NO _x	-	Kväveoxider, både kvävemoxid och kvävedioxid
34 SG	-	Wärtsiläs motor med cylinderdiameter 34 cm och tändstift.
34 DF	-	Wärtsiläs motor med cylinderdiameter 34 cm och pilottändning.
H ₂	-	Vätemolekyl
H ₂ O	-	Vatten
O	-	Syre
CO	-	Kvävemoxid
CO ₂	-	Kvävedioxid
LEL	-	Lägre explosionsrisk
UEL	-	Övre explosionsrisk
LNG	-	Flytande naturgas
TDC	-	Top dead center – Kolvens högsta läge
bTDC	-	before TDC, före kolvens högsta läge
aTDC	-	after TDC, efter kolvens hösta läge
BDC	-	Bottom dead center – Kolvens lägsta läge
bBDC	-	before BDC. Före kolvens lägsta läge
aBDC	-	after BDC. Efter kolvens lägsta läge
HR	-	Heat release. Värmefrigöring
THC	-	Total hydrocarbons. Totala kolväten

ϕ	-	Förhållandet mellan luft och bränsle i motorn
λ	-	Lambda, förhållandet mellan bränsle och luft
AFR	-	Air to fuel ratio, luft-bränsleförhållande
HRR	-	Heat release rate. Värmefrigöringstakt
IMO-TIER III	-	IMO:s utsläppsgränser inom marina områden
NO	-	Kvävemonoxid
NO ₂	-	Kvävedioxid
NOR	-	En av Wärtsiläs NO _x -reducerare
SCR	-	Selective catalytic reduction, selektiv katalytisk reduktion
SO _x	-	Svaveloxider, både svavelmonoxid och svaveldioxid
CO ₂	-	Koldioxid
CH ₄	-	Metan
CR	-	Compression ratio. Kompressionsförhållande

1. Introduktion

I dagens energiteknik är ett av de största frågetecknen hur vi ska kunna minska på utsläppen från de fossila bränslena samt stödja de förnybara energiformerna. Eftersom ca 68 % av världens energiförsörjning idag kommer från fossila bränslen i världen (International Energy Agency, 2014) är det en verklig utmaning att kunna minska på detta.

Orsaken till viljan att minska på de fossila bränslena är bland andra att tillgången på de fossila bränslena inte alltid är pålitlig och jämn samt att det finns en begränsad tillgång på dessa. En motreaktion till detta är att andelen förnybara har ökat snabbt. Som exempel har den installerade vindenergikapaciteten ökat från att utgöra runt 2 % av Europas energiproduktion i 2000 till att utgöra runt 14 % i 2014. (Corbetta, 2015) Det här har lett till ökade problem med elnätsstabiliteten, ett problem som det aktivt söks lösningar till.

I användningen av fossila bränslen ses också en skiftning från kol till naturgas. Eftersom utsläppen av gas är mindre och utsläppsgränserna för energiproduktion, främst i USA, är lägre, föredrar marknaden gas framför andra fossila bränslen. (International Energy Agency, 2014) Det gör att gasmotorer och – turbiner utvecklas kontinuerligt, snabbare än tidigare.

Förnybara energiformer har många bra sidor, men även en del dåliga. Eftersom dessa energiformer utnyttjar naturens krafter blir produktionen svår att förutse och varierar mera än de konventionella energiformerna. Lösningar på hur energi kunde lagras eller dessa krafter övervakas så att största möjliga andel av energin kunde utnyttjas utvecklas hela tiden. En av de former som utvecklas är produktion av väte vid tillfällen av överskottsenergi för att sedan användas vid tillfällen med lägre energiproduktion (Harrison, 2010), eller tillsättas till naturgas. Eftersom förbränning av väte endast ger upphov till vattenånga som utsläpp är detta ett attraktivt alternativ för att minska på utsläppen. Eftersom utvecklingen av att lägga till väte i naturgas ses

som möjlig vill marknaden vara säker på att denna gas kan användas till alla applikationer innan det börjar implementeras.

Avsikten med de experiment som utfördes för denna rapport var att utreda om Wärtsiläs motorer klarar av en högre väteandel i bränslet jämfört med vad som nu tillåts, samt att utreda vad som är begränsande faktorer för vätemängden. Ett annat mål med rapporten är att förstå hur en tillsats av väte påverkar förbränning i en motor. Genom att lägga målet för vätemängden högt, 30 vol-%, säkerställdes att Wärtsiläs motorer klarar av möjliga höjningar av den högsta tillåtna mängden väte i naturgasen.

Forskningsfrågorna är som följer:

- Hur påverkas förbränningen av en tillsats av väte i bränslet?
- Vilka ändringar ska göras på motorerna för att de ska kunna köras på 30 vol-% väte?
- Kan Wärtsilämotorer använda väteberikade bränslen i framtiden?

Hypotesen för undersökningen var att längden på förbränningen kommer att minska till följd av att förbränningshastigheten ökar, samt att utsläppen påverkas av de förändrade omständigheterna i motorn. Knackning i motorn tros öka kraftigt, och medel för att motverka detta studeras. En del teoretiska studier krävdes för att se till att en säker testningsförfaring kunde garanteras. Säkerheten togs på största allvar vid planeringen av vätetesterna. En presentation av vilka åtgärder som togs presenteras i rapporten.

För att göra testningen möjlig behövde verktyget som används i motorlaboratoriet för gasblandning utvecklas. Detta påbörjades under hösten 2014 och slutfördes under vårvintern 2015.

Fokus kommer i denna rapport att ligga på att undersöka vad vätetillägg till naturgas gör åt förbränningen och prestandan i en medelsnabb fyrtaktsgasmotor. Fokus är på förändringar i utsläpp, speciellt NO_x. I rapporten behandlas endast medelsnabba fyraktsmotorer med en blandning av naturgas och vätgas som bränsle. Till rapporten hör tester gjorda på Wärtsiläs 34 SG-motor, som är en tändstiftsmotor som använder gas som bränsle, och Wärtsiläs 34 DF-motor, som är en flerbränslemotor och antänds

med en pilotstråle av diesel. Den senare kan även använda diesel som bränsle, men detta kommer inte att testas i rapporten. Båda motorerna har en cylinderdiameter på 34 cm och som bränsle används i vanliga fall naturgas, och i detta test tillsätts väte i denna. Med testerna förväntas framtidsutsikterna för Wärtsiläs vätgasblandningsmotorer kunna fastställas. Renvätemotorer hör inte till rapporten, och inte heller väteblandning i andra bränslen än naturgas.

2. Väte

2.1 Tidigare forskning inom väteinblandning i naturgas

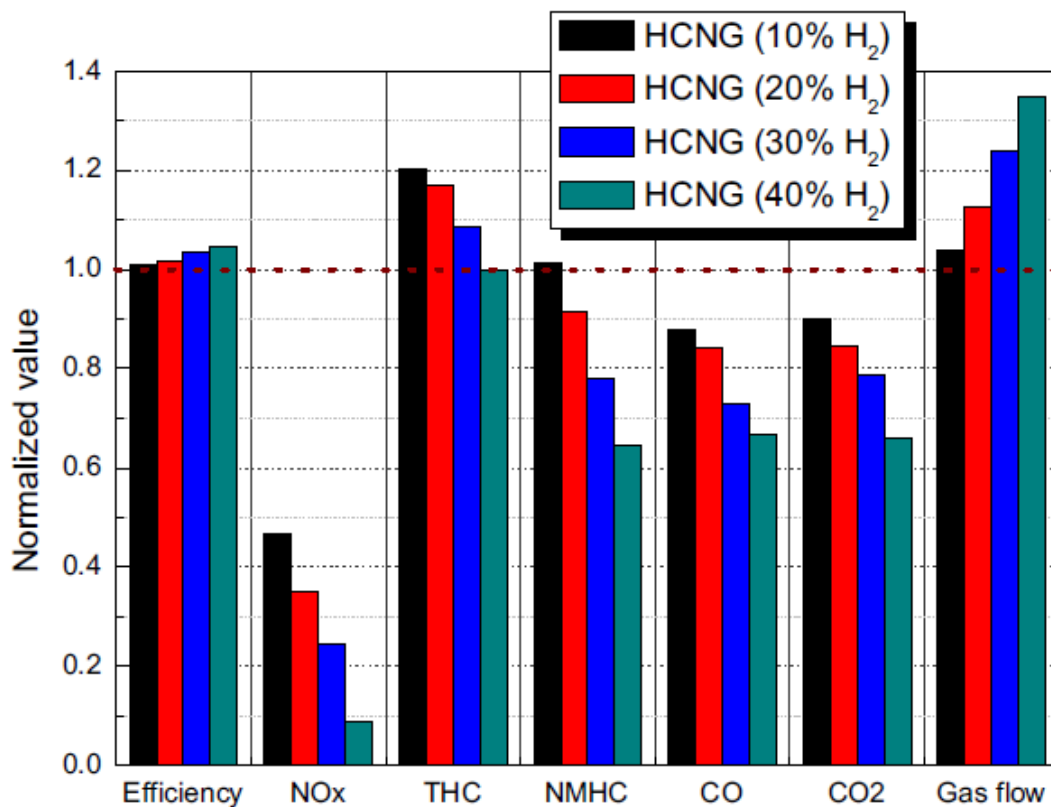
Väte producerat med förnybara energiformer från vatten har kapacitet att sänka de globala växthusgasutsläppen, men är en dyrare energibärare än fossila bränslen. Forskning gjord inom motorer körda på en blandning mellan naturgas och väte visar ändå på att eftersom både kolbaserade utsläpp minskar kan det vara lönsamt. Speciellt i fallet att priset för väte går ner har det en potential att vara med i världsmarknaden. (Akansu, 2004)

Från tidigare finns det en stor mängd forskning inom området med motorer med endast väte som bränsle, utan gasinblandning. Konklusionen av dessa tester är att det går att köra på väte som enda bränsle, men att det finns risker och utmaningar inom området ännu. (Verhelst & Wallner, 2009) Framtiden för väte i transportsektorn har utvärderats, och enligt prognoser kommer användningen av väte att öka (Delorme, 2009).

En litteraturstudie om förändringar som skulle krävas för att en Wärtsilä-motor skulle kunna modifieras till en ren-väte motor har gjorts. Slutsatsen var att det teoretiskt sätt är möjligt för en kraftverksmotor. Att säkerställa säkerheten på ett kraftverk vore enligt studien möjligt, men att garantera säkerheten på fartyg ansågs inte möjligt. Undersökningen gjordes för Wärtsilä 32- och Wärtsilä 34-motorer. Tester gjordes inte i undersökningen. (Pikka, 2012)

Tester som har gjorts med komprimerad naturgas-väteblandningar (HCNG) i en bussmotor visar positiva resultat, med minskade metanutsläpp och ökad effektivitet. I dessa tester hade motorn en hastighet på runt 1200 rpm, kompressionsförhållande på 10.5 och en cylinderdiameter på 12.3 cm. Motorn matades med 30 vol-% väte i naturgas. Den negativa sidan var att kväveoxidutsläppen (NO_x-utsläpp) och metanutsläppen ökade. (Park, 2013) På samma motor gjordes tidigare tester med fokus på NO_x-minskning. En figur över en del av resultaten ses i figur 1. Här visar tester på en minskning i utsläpp vid ökad andel väte i bränslet. Minskningen i NO_x åstadkoms genom att köra vid allt högre lambda, dessa världen är alltså för den högsta möjliga

luftmängden i förbränningen. Att minska NO_x-utsläppen ytterligare kunde åstadkommas genom att ha senare antändningstidpunkt. Vid detta förfarande sänks verkningsgraden för motorn en aning. Vid tillsats av väte till bränslet ökade lufttillsatsen till motorn, så att en mager förbränning (eng. lean burn) skedde hela tiden. Kolväteutsläppen ökade vid tillsats av väte till bränslet, men hade en mindre ökning för högre andelar väte. Det normaliserade värdet i figuren står för en referens till körning på samma motor utan vätetillsats i naturgasen. (Park, 2010)



Figur 1 Uppmätt effekt av vätetillsats till metan på en snabb, liten naturgasmotor. Den stora minskningen i NO_x-utsläpp åstadkoms genom ökat luftgenomdrag i motorn. (Park, 2010)

Andra tester med samma motor har gjorts för att se hur en ändring i kompressionsförhållande påverkar förbränningen. Här ändrades det ursprungliga 10.5 till 11.5 och motsvarande tester som Park et al 2010 utförde. Resultaten visar att ett högre kompressionsförhållande ger en högre verkningsgrad, även med vätetillägg. Resultaten var liknande till de med lägre kompressionsförhållande, med förbättringar

i NOX-utsläppssänkningen och försämringar i kolväteutsläppsminskningen. (Lim, 2014)

Andra experiment där utsläpp minimeras i HCNG-motorer med en fat mängd väte har också gjorts. I experiment av Patil et al. användes 5 vol-% väte. Kompressionsförhållandet för motorn var 11.2 och cylinderdiameter 9.7 cm. Tester med varierande mängd väte utfördes inte. Genom en senare tändningstidpunkt gick NOx-utsläppen ner, tillsammans med kolväteutsläppen och koldioxidutsläppen. (Patil, 2010). Tester med en encylindrig motor med cylinderdiameter 10 cm och kompressionsförhållande 8 visar att betydelsen av korrekt antändningstidpunkt är viktig för direktinsprutmotorer. Här testades väteprocenter mellan 5 och 18 vol-%. Testerna visat bland annat att väteberikad naturgas och ren naturgas reagerar likadant på en ändring i antändningstidpunkten. Resultaten tyder också på minskade NOx- och kolväteutsläpp. Lambda för förbränningen ligger mellan 1.6 och 1.8. (Huang, 2006)

Tester på motorer för personbilar visar att effektiviteten för motorn kan öka upp till en viss andel väte i bränslet samt försnabbar förbränningen. I testerna användes avgasrecirkulering som metod för att minimera växthusgasutsläpp. Studien gjordes på en motor med högt varvtal, där testerna utfördes vid 2000 rpm, högt kompressionsförhållande, 13.5, och med lambda 1. Avgasrecirkulering användes för att minska på NOx-utsläppen och sakta in förbränningen. Vätemängderna som användas var 5, 10 och 15 vol-% i naturgas med mycket hög metanprocent. Eftersom förbränningen saktades in ändrades antändningstidpunkten till en tidigare antändning för ökad recirkulering. Testresultaten tyder på att NOx-minskningen i avgaserna är mera beroende av recirkuleringen än av väteinnehållet, vilket kan bero på att motor justerades för körning med de nya bränsleblandningarna via ändrad mängd recirkulering och ändrad antändningstidpunkt. I studien har förbränningen med 10 vol-% väte den bästa verkningsgraden, då förlusterna på grund av ofullständig förbränning minskar och verkningsgraden av bränslet ökar. En av konklusionerna av studierna är att vätetillägg i CNG kan öka verkningsgraden på motorn, men med risk för ökade NOx-utsläpp. (Dimpoulos, 2008)

Flera tester med motsvarande motorer som testerna gjorda av Park och Lim visar motsvarande resultat gällande tändningstidpunkten. Kompressionsförhållande för

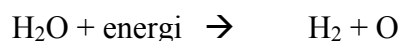
motorn var 10, väteandelarna som användes var 10, 20 och 30 vol-%, varvtalet för motorn 1500-3000 rpm. Tändningstidpunkten konstaterades även här behöva tidigareställas för att nå bra resultat. Även i testet gjort av Kahraman et al. går de kolbaserade utsläppen ner. Vätetilläggets påverkan på NO_x-utsläppen kommenterades inte i studien. (Kahraman, 2009)

2.2 Grunderna om väte

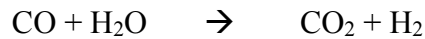
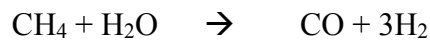
Väte, H, är den minsta och lättaste atomen. Det är det vanligaste naturligt förekommande ämnet på jorden men förekommer oftast i föreningar som vatten (H₂O) eller liknande. Väte har använts mycket genom historien tack vare sin stora lyftkraft och explosivitet. Väte är färglöst, luktlöst, och brinner med en i det närmaste osynlig låga.

Explosivitetsgränserna för väte är betydligt vidare än för andra bränslen. LEL (lower explosive limit, lägre explosivitetsgräns) för väte ligger på 4 %, vilket betyder om luften i ett utrymme består till endast 4 % av väte kan det explodera om en gnista introduceras. LEL för metan ligger på 5 %, så i samma storhetsordning. UEL (upper explosive limit, övre explosivitetsgräns) för metan är 15 %, alltså om luftbränsleblandningen har mera än 15 % av bränsle i sig kommer det inte att antändas om en gnista introduceras, medan detta tal för väte är 75 %, vilket är exceptionellt högt. (Soundarrajan & Schweighardt, 2009) Detta gör det till ett farligt ämne att ha i stora kvantiteter, för vid läckage kan en brand starta av i det närmaste vilken energikälla som helst. Dessa fakta gör att säkerhetsaspekterna vid användning är komplexa och kräver en del eftertanke., exempelvis statisk spänning eller värme.

Väte räknas som en energibärare med stor utvecklingspotential i dagens läge eftersom förbränningens slutprodukt endast är vatten (H₂O). Väte kan produceras genom elektrolys av vatten enligt följande:



Här är produkterna endast väte och syre, vilka båda kan användas till nyttiga processer inom industrin. Väte kan också produceras från naturgas via ångreforming i två steg:



Det första steget i processen kräver ånga vid höga temperaturer, vilket kräver stora mängder energi. För att få ren väte ur processen måste sedan vätet separeras från koldioxiden. För att minimera koldioxidutsläppen borde denna producerade koldioxid tas tillvara. För att få en naturvänligare produkt borde väte produceras via elektrolys. (Pant, 2009) Kostnaderna för de olika produktionssätten varierar kraftigt, med ångreforming betydligt billigare än elektrolys, på grund av att elektrolysen behöver så mycket mera energi. (Pant, 2009)

2.3 Transport och förvaring

Väte har väldigt låg energidensitet vid normalt lufttryck och temperatur, ca 1 l m³/kg, därför behövs endera en ökning i tryck eller en sänkning av temperatur för att möjliggöra lönsam transport. Eftersom väte kräver väldigt låga temperaturer för att vara flytande (20 K) är komprimerat väte det etablerade sättet att transportera väte inom industrin. Vanligaste sättet har varit via stålflaskor med högt tryck (200-250 bar). Ett sätt att få ner vikten och upp energidensiteten är att använda kompositflaskor istället för stål, vilket minskar risken för explosioner vid läckor och möjliggör ökat tryck, runt 600 bar. Nya sätt att lagra väte utvecklas. Ett exempel är vätehydrider, där väte tvingas in i en metall där den bildar hydrider. Detta ger en säker och stabil lagringsform, men denna metod är även dyr och tidskrävande. (Gao & Krishnamurthy, 2009) Eftersom väte är lätt och lättantändligt rekommenderas det att det förvaras utomhus, utan antändningskällor i närheten.

2.4 Väteförsprödning

Då material utsätts för väte kan det att reagera på ofördelaktiga sätt, framför allt genom att försprödas av vätet. Det beror på att vissa metaller absorberar en del av vätet så att styrkan och strukturen på materialet ändrar. Ifall det i detta skede utsätts för högt tryck eller spänningar kan det spricka eller brista. Orsakerna kan vara många, men eftersom det är svårt att se försprödning före en spricka uppstår är det viktigt att känna till risken. Det händer speciellt åt starka material, så metaller kan utsättas, speciellt hårda metaller. För att undvika försprödning kan man belägga de utsatta materialen med en skyddande hinna, samt om möjligt undvika de temperaturer där försprödning vanligast förekommer (200-300 K). (Rigas & Skalavounos, 2009)

2.5 Väte som elnätsstabilisator

Det har diskuterats om väte skall tilläggas till naturgasnätverket. Enligt en utredning kunde 2-5 % väte vara acceptabelt för gasmotorer. Rekommendationen i den utredningen var att variationen i vätemängd i bränsle skulle begränsas till under 2 % / min. (Altfeld, 2013)

Det finns gasnätverk för naturgas i många länder. Utredningar om hur stor procent väte man kan blanda in i USA:s system utan att stöta på problem har gjorts. En undersökning visar att riskerna med nätverket inte ökar då mängden väte hålls under 20 vol -% väte. (Melaina, 2013)

Eftersom väte kan produceras från vatten och vid förbränning generera endast vatten är dess möjligheter i att motverka klimatförändringen stor. Många av de problem med förvaring och transport som rent väte ger upphov till kan undvikas om vätet tilläggs till naturgasen istället för att användas som sådant. Här kan man använda väte utan att förändra någonting, vilket är en stor fördel mot ren väteanvändning som skulle behöva en egen infrastruktur och anpassning av de applikationer det används i. I Tyskland görs

det experiment som kan ge mera information till resten av världen hur detta går till, och var problem uppstår.(Melaina, 2013)

Allt eftersom de förnybara energikällornas andel av energiproduktionen blir större, ökar också de tillfälliga variationerna i energiproduktionen. Detta ger vid utbredd användning av förnybara energiformer upphov till en ökad instabilitet på marknaden. För att motverka detta finns olika lagringssätt för energin, exempelvis ångackumulatorer. Ett annat alternativ till elnätsstabilisatorer är att producera väte med överskottet av energi för att senare förbränna detta i gasturbiner/motorer. På detta sätt kunde en del av vätets negativa sidor, alltså dess höga beroende av energipris för tillverkningspris, minimeras.

E-On har ett projekt i Tyskland där väte injiceras i gasnätverket. (E-On, 2013) Om detta tillvägagångssätt blir vanligare i framtiden kommer en ökning av de förnybara energiformerna att möjliggöras samtidigt som ett mera energirikt bränsle fås till stånd i väte-gas-blandningen. Resultaten från E-Ons pilotprojekt i Tyskland kommer förhoppningsvis ge en fingervisning denna teknologis framtidsutsikter.

Enligt standarder är naturgas som innehåller under 25 vol-% väte ännu klassificerad som naturgas. Detta betyder att en högre väteandel än detta i bränslet leder till en annan, högre säkerhetsklassificering, vilket kan betyda extra kostnader. (International Electrotechnical Commission, 2010)

2.6 Säkerhet

Väte är luktfritt och färglöst, och kan inte upptäckas av människan. Läckor kan ge upphov till kvävning eller explosioner med efterföljande skador. Vätelågor är mycket varma, i praktiken osynliga och därför farliga för människan. (Rigas & Skalavounos, 2009)

För att använda väte inomhus behövs ett pålitligt och stabilt sätt att snabbt upptäcka läckor på. Eftersom väte är en lätt gas kommer det att stiga uppåt om det uppstår en läcka. För att upptäcka en sådan behövs det en sensor som kan registrera väte, vilket

en vanlig gassensor inte upptäcker. För detta finns specifika vätedetektorer. Eftersom väte har väldigt brett explosionsintervall bör en detektor upptäcka minsta läcka för att se till att säker operation och användning av väte kan säkerställas. Gränsen för alarm på vätedetektorer bör ställas lågt, så att även små läckor uppmärksammas och åtgärdas. (Soundarrajan & Schweighardt, 2009)

Att upptäcka vätelågor är en svårare process än att upptäcka väteläckor. För att upptäcka läckor kan infrakameror användas för att upptäcka värmeprofilen för lågor. Ett annat alternativ är att upptäcka förluster av väte, alltså att det upptäcks att en del väte går till spillo på vägen från källan till användningsområdet.

En blandning av väte och naturgas borde vid en läcka ge utslag på både gasdetektorer och vätedetektorer. Om det är mindre läckor kan det tänkas att endast väte läcker, vilket är farligare på grund av bristen på luft- och färgvarningar. Om en låga uppstår vid denna gas borde det uppstå en synlig låga. Tack vare detta borde det vara säkrare att använda en blandning än rent väte.

Sensorerna som mäter gasläckagen i motorcellen mäter endast en gas i taget, alltså att det finns olika sensorer för metan och väte. Eftersom LEL av en gasblandning kommer att bero av hur blandningen av den explosiva gasen ser ut, enligt formel 1. (Coward & Jones, 1952) För att säkerställa en pålitlig LEL-mätning borde sensorerna mäta alla explosiva gaser. De sensorer som användes i dessa tester hade inte denna egenskap, men de larmgränser som lades in för de enskilda LEL-alarmen var så låga att säkerheten bibehölls. För att räkna ut LEL för en blandning av gaser används formel 1:

$$LEL_{bland} = \frac{1}{\frac{c_1}{LEL_1} + \frac{c_2}{LEL_2}} \quad (1)$$

, där c_1 och c_2 står för koncentrationen av de olika gaserna i blandningen, och LEL_1 och LEL_2 står för LEL för de individuella gaserna.

3. Förberedelser

3.1 Blandstation

För att kunna utföra tester med väteblandning i naturgas behövdes motorlaboratoriets blandstation uppdateras. Avsikten med stationen är att ge en pålitlig, kontrollerbar mängd av en eller flera gaser på ett säkert och användarvänligt sätt. Tidigare har det funnits en station som kan tillföra en liten mängd av diverse gaser, men att blanda stora flöden och att blanda väte har inte varit möjligt. För att möjliggöra detta uppdaterades blandstationen från hösten 2014 till våren 2015.

Blandstationen har utvecklats för att man ska kunna använda flera gaser och större flöden än tidigare. Den använder en bärgas, i Wärtsiläs fall LNG, i vilken den tillför en förhandsbestämd och reglerbar mängd av en eller flera andra gaser. I slutet av linjen där alla gaser har blandats in finns en statisk blandare som ska se till att blandningen är homogen. All blandning sköts i en skild byggnad utanför motorlaboratoriet, alltså i blandstationen. Från denna går ett uppvärmt rör in till motorlaboratoriets testceller. Genom att blanda gaser och förvara dem utanför byggnaden med motorer ökas säkerheten och pålitligheten för blandningen ökas. Arbetet att uppdatera blandstationen har planerats och utförts av AGA.

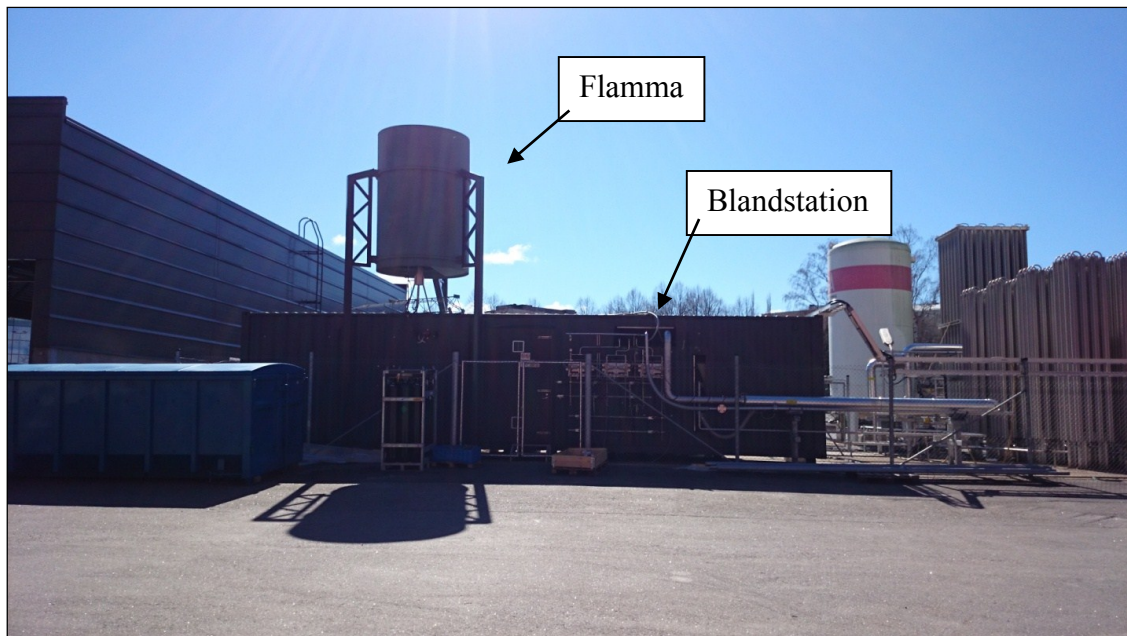
Säkerheten i blandstationen har säkerställts genom att installera gas- och vätedetektorer inne i stationen samt genom att begränsa tillgången till stationen då väte var i bruk. Detektorerna ger alarm till övervakningen, där säkerheten för hela operationen säkerställdes.

Då vätgas har liten åtgång och tillgång i Finland kom den i flaskpaket på 150 flaskor, alla med ca 1 kg gas i sig. Eftersom väte är explosivt är det viktigt att tiden den förvaras på området minimeras. Genom noggrann planering minimerades tiden gasen förvarades på området, både för att minimera riskerna och utgifterna.

För att övervaka att blandningen som kommer in till motorn är homogen blandning analyseras gasen före motorn med en gaskromatograf. Denna fungerar som en kontroll,

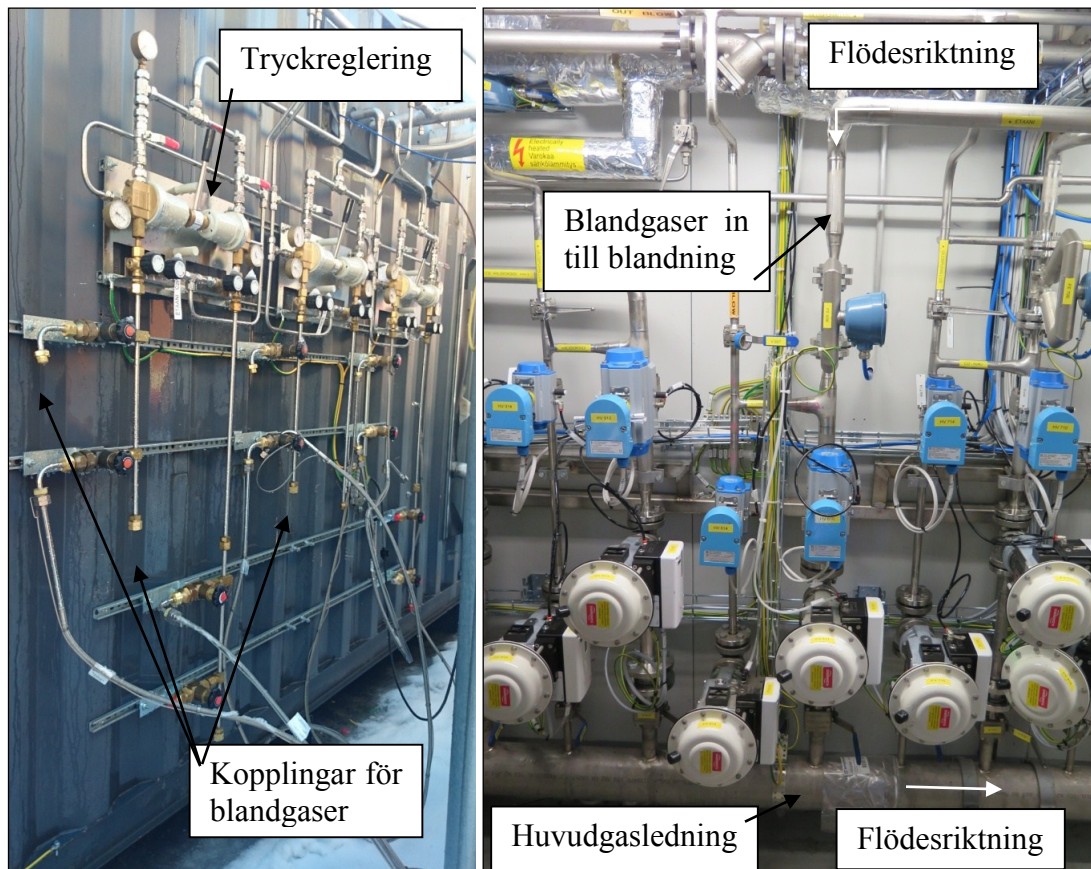
eftersom flödesmätare registrerar all gas som går ut från varje linje. Detta ger ytterligare en möjlighet till en säkerhetskontroll, då vi kan kontrollera om flödena stämmer överens före gasen kommer in till motorcellen. Om de avviker tyder det på ett fel i mätningarna, eller på en läcka. Eftersom många olika gaser används i denna blandstation så är säkerheten ytterst viktig och att se till att olika gaser inte blandas oövervakat är av yttersta vikt.

Utsidan av blandstationen ses i figur 2. Cylindern på taket av stationen är en flamma för att bränna bort bränsle i rören eller oskadliggöra all möjlig gas som kan finnas i rör eller utrymmen vid problemsituationer.



Figur 2 Blandstationen

På vänstra sidan av figur 3 syns utsidan av blandstationen, där blandgaserna leds in i stationen. Här är inga gaser inkopplade, men kopplingarna för blandgaserna syns, samt tryckreglerarna. På högra sidan av figur 3 ses insidan av stationen, där blandgaserna leds från utsidan in i huvudgasen. Blandgaserna kommer uppifrån, och nederst i bilden ses huvudgasledningen. I denna blandas alla gaser, och leder sedan in till cellen. I bilden syns också de olika ventilerna som ser till att en jämn blandning fås till stånd.



Figur 3 Utsidan respektive insidan av blandstationen

3.2 Testcell

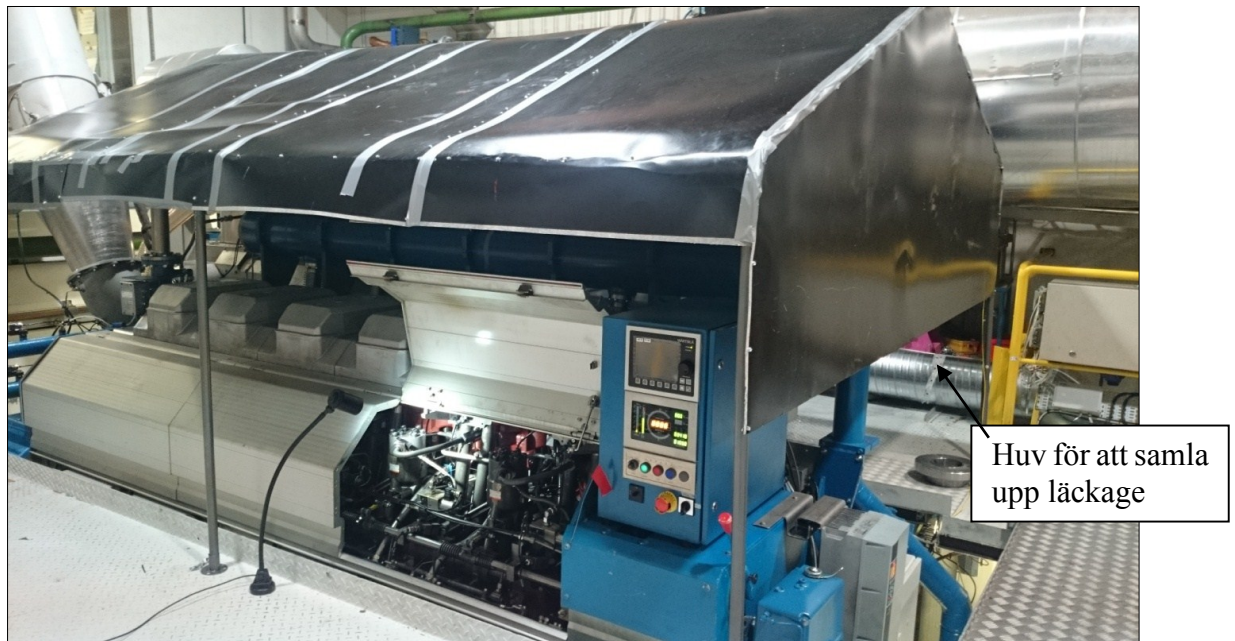
Före väte kunde börja användas i motorlaboratoriet behövde säkerheten ses över. Eftersom den LNG som används i laboratoriet till största delen består av metan behövdes luftombytet och gassensorerna ändras då väte är en mindre molekyl och en lättare antändbar gas än det som vanligtvis används. För en renvätemotor är det rekommenderade luftombytet 1-2 ggr/min (Verhelst & Wallner, 2009) vilket användes som referens fast dessa tester inte omfattade renvätetester. För att lokalt öka luftombytet och minimera risken för explosioner tillsattes det huvar över de ställen som läckor kunde inträffa och en extra fläkt tillsattes för att suga ut den luft som

samlades upp i dessa huvar. Luften sögs till utsidan av cellen och släpptes ut i utomhusluften. Eftersom vätet sprider sig snabbt är explosionsrisken liten med detta förfarande. De ställen där läckor kunde inträffa var alla flänsfogar, över motorn samt över gastrycksegleringsenheten. För att säkerställa att ingen statisk elektricitet kunde antända de möjliga läckorna gjordes de två stora huvarna (över gasregleringsenheten och motorn) av metall och jordades. Vätesensorer installerades vid ytterväggen, alltså där alla flöden samlades till ett rör, ovanför motorn, och ovanför gastrycksregleringsenheten där risken för läckor var störst. Sensorerna var kopplade till övervakningsstationen och programmerade att ge alarm för 10 % LEL, alltså 0,4 % väte. I cellen finns ett antal gassensorer för metanläckor, vilka fungerade som extra säkerhet. Eftersom vätet är blandat i naturgas då när det kommer in till testcellen borde metan också läcka om väte läcker, så metansensorerna ger också utslag vid en gasläcka.

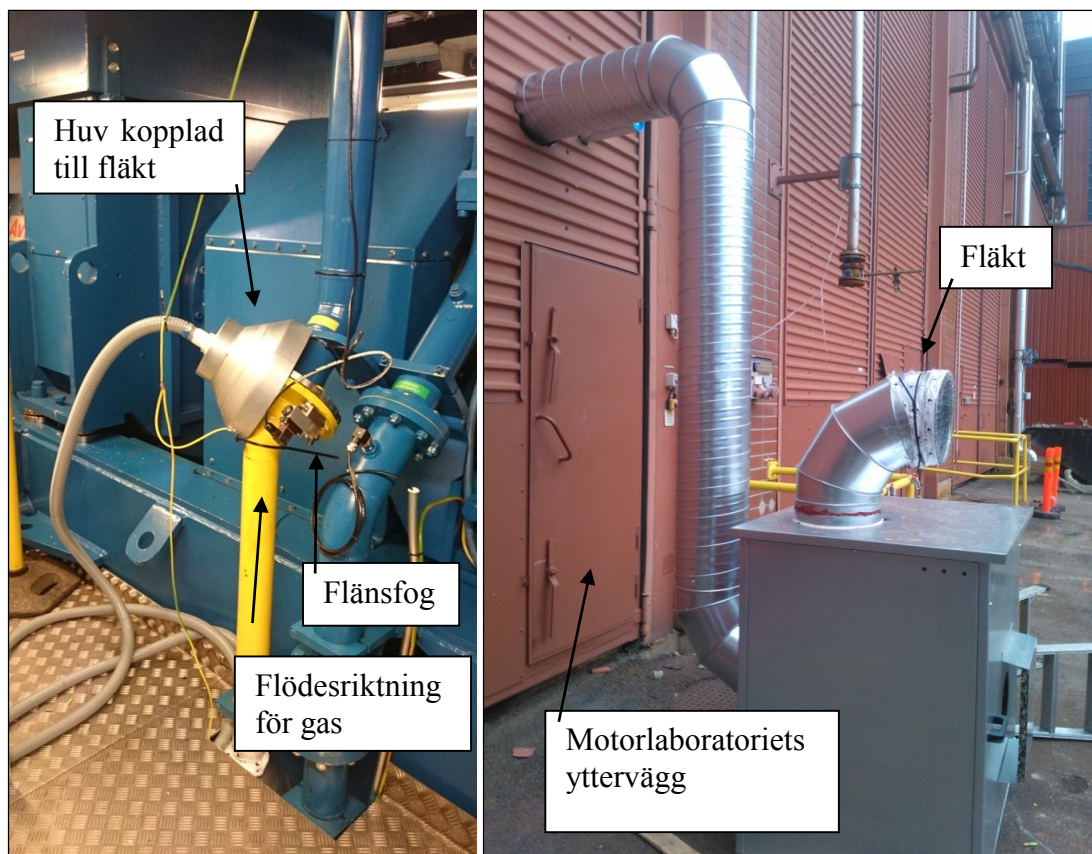
I figur 4 ses huven ovanför en Wärtsilä 34 DF-motor. Samma huv användes för testerna på en Wärtsilä 34 SG-motor. I taket av huven finns en slang för utsug som kan ses ur figur 6, där också huven ur ett annat perspektiv kan ses.

Till väster i figur 5 ses en huv ovanför en av flänsfogarna samt riktningen på den inkommande gasen. Till höger i samma figur syns den fläkt som användes för att pumpa ut luften som samlades upp i huvarna ovanför eventuella läckageområden. Den var placerad på bakgården av laboratoriet, precis utanför ytterväggen. Huven ovanför Wärtsilä 34 DF-motorn ses nerifrån i figur 6. Här syns utsuget inne i huven, som leder till fläkten utanför laboratoriet.

I figur 7 syns det hur luften från de nämnda huvarna samlats till ett rör och leds ut genom ytterväggen till fläkten på utsidan. Till höger ses SG-motorns utsug och till vänster ses DF-motorns. Här syns också vätesensorn på ovansidan av röret. Huven ovanför gastrycksregleringsenheten ses i figur 8.



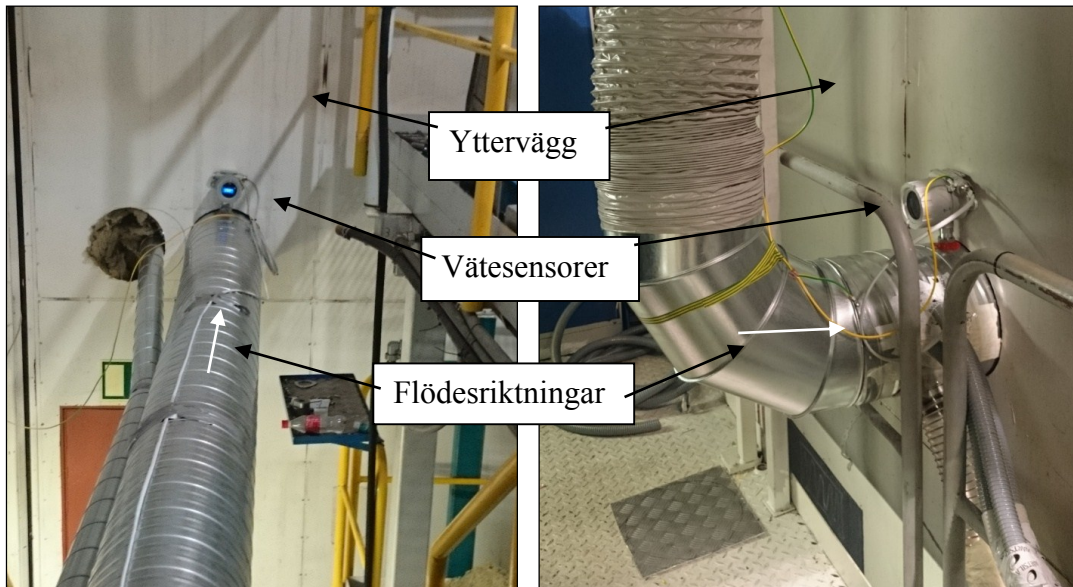
Figur 4 Huv ovanför 34 DF-testmotorn



Figur 5 En huv över en flänsfog i testcellen samt fläkten som användes för att pumpa ut luften från huvarna



Figur 6 Huv ovanför 34 DF-testmotorn



Figur 7 Utblås till ytterluften från cellen på 34 SG samt 34 DF



Figur 8 Huv ovanför gastrycksregleringsenheten.

3.3 Säkerhet

Eftersom väte inte luktar men är farligt för hälsan är det viktigt att arbetare inte utsätts för denna gas. Genom att se till att inga andra aktiviteter pågår i testcellen under tiden det kan förekomma läckor minimeras denna risk. Eftersom testcellerna vanligtvis har två motorer så rekommenderades det att den andra motorn i cellen inte användes under tiden dessa tester kördes.

Åtkomst till cellen förbjöds genom att lägga skyltar på alla dörrar för att se till att endast de som hade rättighet att gå in i cellen gick in i cellen. Ett exempel på märkningen kan ses från figur 9. Om någon från testgruppen gick in i cellen hade dessa på sig handburna sensorer för att upptäcka läckor direkt, och vätekörningen avbröts under tiden någon var i cellen för att återupptas när de var tillbaka på plats.



Figur 9 Märkning på cellens dörrar

För att säkerställa att ingen gick in i blandstationen gjordes samma sak runt denna, se figur 10. Genom att spärra av området runt vätebehållaren och meddela alla blandstationens användare att man inte bör vistas där hölls den tom under testet. Genom att det fanns kameraövervakning av blandstationen kunde det också från

övervakningen kontrolleras att ingen rörde sig på området olovligt. Det att vätebehållaren var klart märkt gjorde också att färre människor rörde sig i närheten.

Alla som var inblandade i dessa tester fick en säkerhetsskolning i hur man använder väte och vilka risker det är sammankopplat med. Genom att det även meddelades till de som kunde beröras av de tidigare nämnda restriktionerna i användning sågs det till att alla berörda kände till riskerna och farorna.



Figur 10 Märkning runt vätebehållaren

4. Förbränningsmotorer

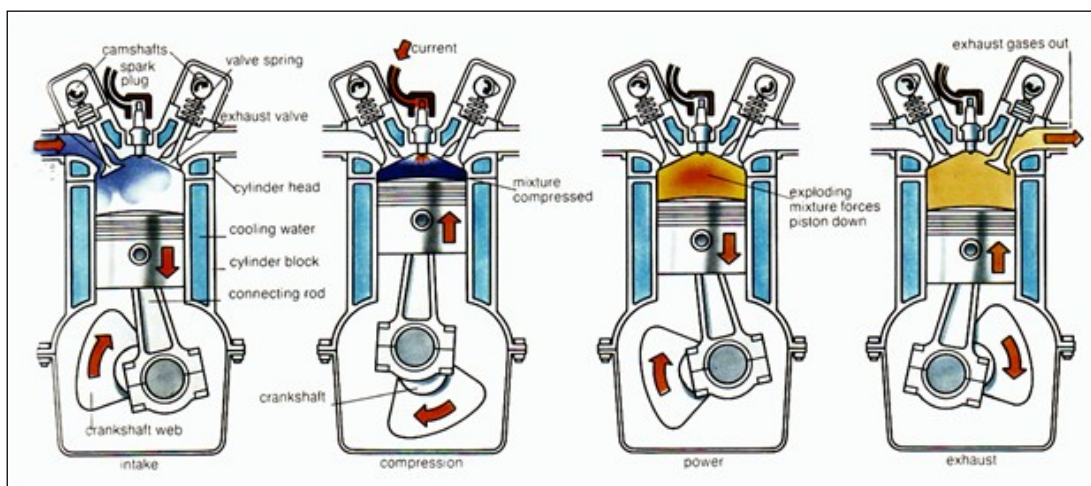
4.1 Gasmotorer

Med gasmotor anses här en motor som använder som naturgas som huvudsakligt bränsle. Eftersom kvalitén på naturgas kan variera ganska mycket är det viktigt att specificera vilken naturgas som används, framför allt hur mycket metan denna innehåller. Vanligen varierar metaninnehållen mellan 80 och 95 %.

En gasmotor har oftast lägre utsläpp än en dieselmotor, på grund av att förbränningen är effektivare och gasen lättare att antända. Gasmotorerna har överlag ungefär samma marknad som dieselmotorer, alltså för energiproduktion, transport och stabilisering av elproduktion. I denna rapport kommer endast större motorer att beaktas, alltså fyrtaktsmotorer på medelhastighet för marin- och kraftverksindustrin.

Fyrtaktskonceptet innefattar att kolven i motorn har fyra olika skeden eller drag: intagsdrag, kompressionsdrag, expansionsdrag eller kraftdrag och utläppsdraget. De olika dragen har olika uppgifter, vilket de olika namnen ger en hänvisning till. En bild på de olika dragen och hur inspruts- och utläppsventilerna rör sig kan ses i figur 11.

Positionen för kolven i kombination med informationen om i vilken fas kolven befinner sig är det som främst används för att analysera vad som händer och hur timingen ändras i motorn. Detta uttrycks bl.a. med termerna TDB (top dead center, cylinderns högsta position), bTDC (before TDC, grader före cylinderns högsta läge), aTDC (after TDC, grader efter cylinderns högsta läge) och motsvarande för cylinderns lägsta läge, BDC, med bBDC och aBDC. I dessa är en cykel med fyra drag 2×360 grader, så varje enskilt drag är 180 grader långt.



Figur 11 Fyrtaktsmotorns grundprinciper (makingdifferent.com)

Tändningen sker vanligtvis några grader bTDC, och förbränningen pågår till några grader aTDC, i brytningen mellan kompressions- och kraftdraget. För att få maximal effekt ur motorn borde all värme frigöras bTDC, alltså då medan den ännu kan användas till att driva kolven uppåt. Detta sker oftast inte i praktiken. Energifrigörningen i förbränningen, HR (eng. Heat release) är en betydande parameter speciellt då när kontroll av förbränningen är viktig. Förbränningens längd är avgörande för hur stor del av energin som kan utnyttjas i en motor med fast varvtal, så som en Wärtsilämotor, där en kort förbränning möjliggör en effektivare reaktion.

4.2 Wärtsilä-motorer

Inom Wärtsilä kan motorer gå på både gas, diesel samt både och. I denna rapport kommer endast de som kan gå på gas att behandlas, alltså SG, som kan gå endast på gas, och DF i gasläge, alltså en motor som kan gå på både diesel och gas. Den största skillnaden mellan SG- och DF-motorer är antändningsmekanismen. DF antänds via en pilotstråle av diesel och SG antänds med ett tändstift i en förkammare. Utsläppskaraktäristika från dessa antändningssätt är olika varandra, eftersom pilotinsprutningens antändning ger upphov till mycket NO_x-utsläpp (totala kväveoxidutsläpp) på grund av den höga antändningstemperaturen för dieseln.

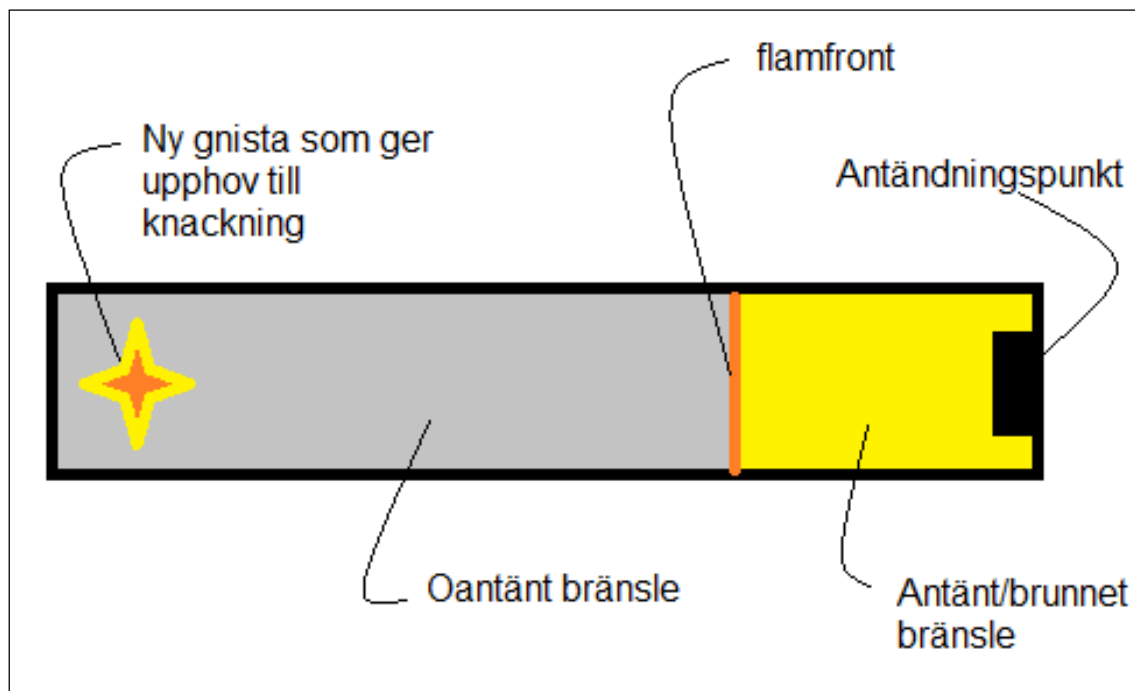
4.3 Knackning och förtändning

Några av de mest begränsande faktorerna i förbränningsmotorer är att bränsle inte antänds på rätt tidpunkt och plats. Om bränslet antänds för sent eller inte alls ("quenching", kvävning) kan det leda till en oönskad ökning av utsläpp av kolväten (THC). Om bränslet antänds för tidigt ("preignition", förtändning) blir förbränningen i svår att kontrollera och slitaget på motorn ökar kraftigt. Om bränslet tänds på fel plats i kolven ("knocking", knackning) sliter detta också på motorn och ger upphov till ett knackande ljud.

Knackning uppstår då bränslet i cylindern antänds före flamfronten har nått den avdelningen av bränslet, alltså att bränslet antänds för tidigt och inte i den ordning det borde. Detta beror på höga temperaturer och höga tryck i cylindern. En förenklad bild av detta kan ses ur figur 12. Där antänds bränslet på fel ställe, till vänster i bilden, vilket leder till knackning. Om förbränningen skulle fortskrida optimalt skulle flamfronten, den orange linjen, antända bränslet då den når fram till oantänt bränsle. I och med att bränslet antänds på fel ställe ger detta upphov till vibrationer på grund av tryckvågen som skapas vid förbränningen. Detta sker vid maximalt tryck i cylindern, alltså då när kolven är högst upp och förbränningen påbörjats i cylindern. Knackning är på grund av de skador på motorn som det ger upphov till en begränsande faktor för förbränningen.

Knackning i motorer påverkas mest av kompressionsförhållandet (CR, compression ratio) samt temperaturen på luften som går in i motorn. Kompressionsförhållandet handlar om hur stor del av cylindern som förblir okomprimerad efter att maximal komprimering har uppnåtts vid kompressionsdraget i motorn. (Li, 2004)

För att minimera knackning i motorn kan man endera hålla trycket eller temperaturen nere. Eftersom en minskning i tryck ger försämrade effektivitet föredras det att sänka temperaturen. Detta kan skötas via luftkylning med "scavenging", alltså att luft spolrar genom cylindern och tar bort en del av värmen. Andra sätt att sänka temperaturen är att injicera vattenånga eller annan inert gas i cylindern.



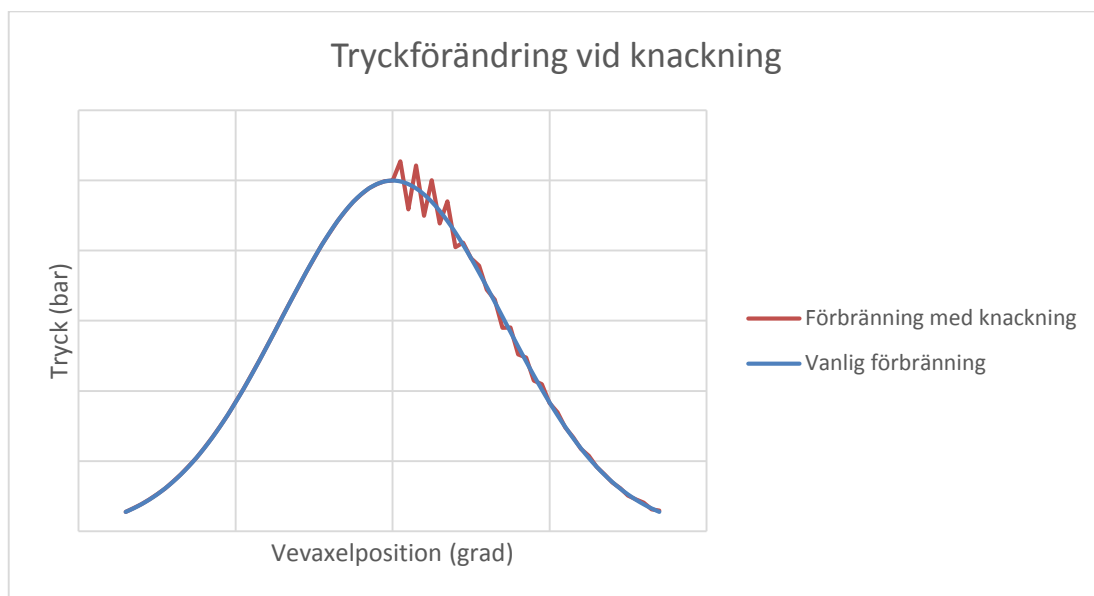
Figur 12 Kort förklaring om hur knackning uppstår.

Knackning kan påverkas genom att motorn designas så att så få antändningskällor som möjligt finns vid oönskade antändningspunkter. En antändningskälla kan vara ett område med högre temperatur än resten av motorn. Knackningen kan också påverkas av bränslet som används. Hur ett bränsle beter sig med avsett på hur mycket det knackar beror till stor del på hur det kemiskt är uppbyggt. Några avgörande faktorer är längden och strukturen på kolkedjorna, där långa odelade kolkedjor knackar lättare. (Heywood, 1988)

Flamfronten i figur 12 är inte helt överensstämmande med verkligheten. På bilden ser det ut som att bränslet antänds jämt längs fronten, men i verkligheten är flamfronten turbulent och är "skrynklig". Den turbulenta och laminära flamfronten förklaras senare i rapporten.

När knackning uppstår i cylindern sker det då trycket är som högst, alltså vid TDC. Eftersom förbränningen då sker på ett annat ställe än det avsedda i cylindern kommer knackningen ge upphov till en tryckvåg som får till stånd en oscillation av trycket i

cylindern. I figur 13 visualiseras hur skillnaden mellan en vanlig förbränningscykel jämförd och en med knackning kan se ut. Eftersom tryckökningen sker då trycket är som högst i cylindern ökar knackningen på det maximala trycket i cylindern vilket kan leda till skador på motorn. (Heywood, 1988)



Figur 13 En jämförelse av tryckförändring i cylindern mellan vanlig förbränning och förbränning med knackning

4.4 Timing

Antändningstidpunkten är när bränsleblandningen i cylindern antänds. Denna parameter används för att reglera när den maximala värmeutvecklingen sker samt hur snabbt bränslet brinner upp. Om bränslet antänds senare kommer en större andel av energin att gå åt till att driva motorn, och mindre till att öka trycket i cylindern eller höja temperaturen. På grund av detta utvecklar sig lågan snabbare och ändrar hur gasen expanderar inne i cylindern. Detta värde ges i grader före TDC.

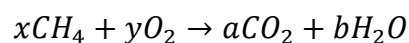
På SG-motorer betyder tändningstidpunkten när gnistan från tändstiftet bildas, vilket kan ställas in på motorerna. På en DF bestäms tändningstidpunkten av när pilotinsprutningen börjar i cylindern. Här kan även pilotinsprutningens längd justeras.

Om man har en senare tändningstiming kan NO_x-utsläppen gå ner på grund av att värmen frigörs senare. Tidigare forskning har visat att vid tidigare timing är värmeeffektiviteten högre, men utsläppen också högre. (Lim, 2014)

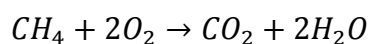
4.5 Lufttillförsel/lambda

Lambda, λ , är mängden luft i förhållande till den stökiometriska mängden luft ett visst bränsle behöver. Vid lambda 1 kommer mängden luft vara den mängd som bränslet behöver för stökiometrisk förbränning. Vid högre lambda kommer en del av luften att gå åt till att kyla ner cylindern och bränsleblandningen i motorn kommer att vara mager. Genom högre lambda kommer cylindern ha lägre temperatur, vilket minskar risken för knockning och minskar hastigheten på NO_x-bildningen. Risken för att blandningen inte antänds i cylindern är dock högre, eftersom blandningen blir magrare så den lättare kvävs. Wärtsiläs motorer har hög lambda, och går på mager bränsleblandning.

I en stökiometrisk blandning finns lika mycket syre som behövs för fullständig förbränning. Lufttillförseln till cylindern bestäms enligt detta. För olika bränslen finns olika luftbehov. En exempelräkning för metan finns nedan.



För att få jämna tal på x, y, a och b bör x och a vara 1, och y och b vara 2. Då ser reaktionen ut såhär:



För två molekyler bränsle behövs alltså två molekyler syre. För att få förhållandet i massa dividerar vi massan för en molekyl syre med massan för en molekyl metan:

$$\frac{y(M_{O_2})}{x(M_C + M_{H_4})} = \frac{2(16u * 2)}{12.01u + 4 * 1.008u} = 3.99$$

För att få reda på det behovet av luft till motorn räknas ett förhållande mellan hur mycket syre som behövs och hur mycket syre som finns i luft ut. Detta förhållande betecknas AFR (air to fuel ratio, luft-bränsleförhållande). Eftersom intagsluften till motorerna endast till cirka 23.2 % är syre blir den verkliga mängden intagsluft för stökiometrisk förbränning

$$AFR = \frac{3.99}{0.232} = 17.2 \text{ kg luft / kg bränsle}$$

För att ha en stökiometrisk förbränning i en metanmotor ska intagsluftmassan vara cirka 17 gånger större än bränslemassflödet. Motsvarande förhållande för en blandning med 30 vol-% väte blir närmare 18, då vätets luft/bränsle-förhållande är 34 och vätets massprocent 5.1. Lambda för dessa blandningar är den verkliga mängde luft som kommer in dividerat med det stökiometriska luft-bränsleförhållandet. Standardvärden för en Wärtsilämotor är runt 2. Både begreppen luft-bränsle-förhållande (λ) och bränsle-luft-förhållande (ϕ) används. I formel 2 presenteras sambandet mellan λ och ϕ .

$$\lambda = \frac{1}{\phi} = \frac{\dot{V}}{AFR} \quad (2)$$

, där lufttillförseln till motorn betecknats \dot{V} , och det stökiometriska luftbehovet med AFR. Det approximerade luftbehovet för förbränning med naturgas och naturgas-vätgasblandningar finns i tabell 1. Här är lambda antagits vara konstant 2. Det framkommer tydligt ur tabellen att luftbehovet ökar vid ökad mängd väte i bränslet.

Tabell 1 Det teoretiska luftbehovet för naturgas och naturgas-väteblandningar.

Bränsle	Lambda (λ)	AFR	Luftbehov (kg _{luft} /kg _{bränsle})
NG	2	17.2	34.4
NG + 15 % väte	2	17.6	35.1
NG+ 30 % väte	2	18.0	36.1
NG : Naturgas			

4.6 Miller

Genom att justera timingen på insprut- och utsläppsventiler kan temperaturen ställas till en del i en gasmotor. Detta kallas då för en Miller-motor, och kan höja verkningsgraden för en motor. Med Miller-timing stängs insläppsventilen betydligt tidigare än vid normal timing, vilket leder till att ventilen stänger redan före BDC. Vid användande av avancerad Miller krävs en turbo. På en standardmotor kan inte detta justeras. (Wärtsilä, 2008)

4.7 Värmefrigöringstakt

Värmefrigöringstakten (Heat release rate, HRR) bestämmer hur snabbt energin frigörs vid förbränning. Vid en snabb HRR kommer bränslet att brinna snabbt och intensivt och vid en låg kommer förbränningen vara långsam. För att räkna ut HRR kan formel 3 användas.

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU_s}{dt} \quad (3)$$

, där dQ_n/dt är verkliga HRR, p är trycket vid förbränningen, dV/dt är volymförändringen över tid och dU_s/dt är förändringen i den inre energin av materialet i förbränning. (Heywood, 1988) Av denna formel kan härröras att HRR ökar om trycket ökar i förbränningskammaren, vilket betyder att ett högre

kompressionsförhållande ger en intensivare förbränning samt att förbränningen är snabb vid TDC. På grund av volymförändringdtermen i formeln kan också härröras att en högre motorhastighet leder till en snabbare HRR, och därmed en snabbare förbränning. Eftersom inre energin av materialet också påverkar HRR kommer olika material att ha olika hastigheter vid förbränningen.

4.8 Flamhastighet

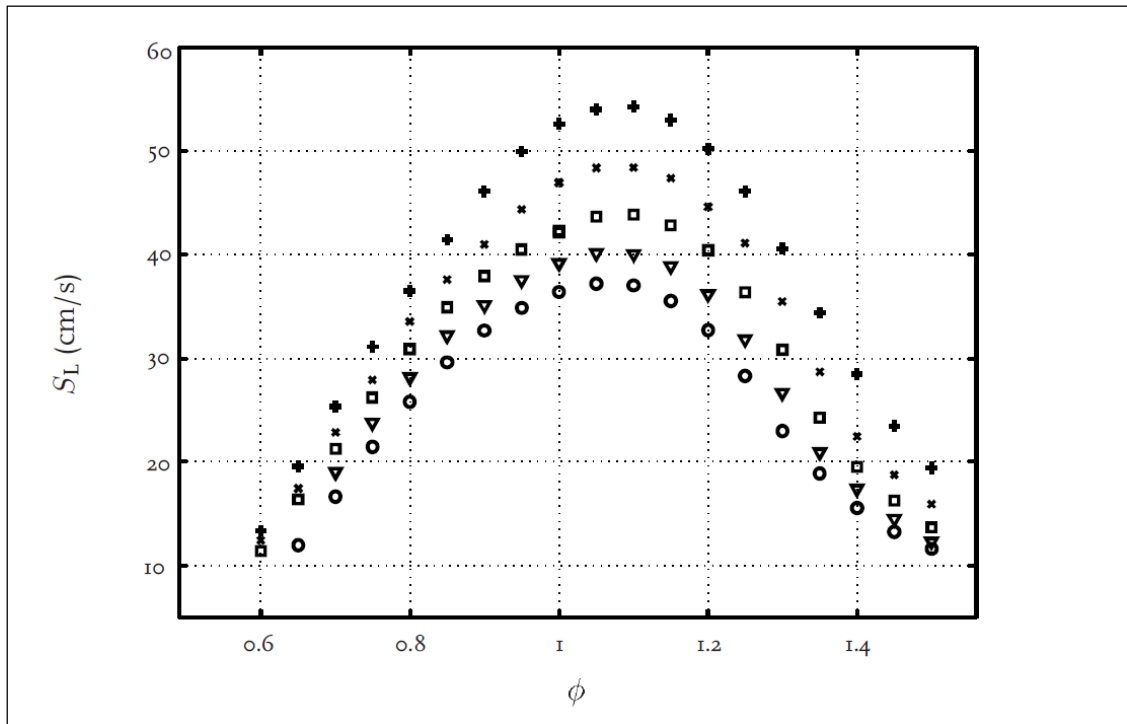
Då en låga får brinna utan påverkan utifrån kommer lågfronten att sprida sig med konstant hastighet, den så kallade laminära flamhastigheten. Denna bestäms av bränslets sammansättning, av hur reaktivt detta är. Den maximala hastigheten för metan är runt 36 cm/s vid vanliga luftförhållanden. För väte är hastigheten betydligt högre. Förbränningen i en motor är inte laminär, utan turbulent med höga hastigheter. (Hermanns, 2007) Förbränningsvaraktigheten beskriver hur länge förbränningen pågår. Om flamhastigheten är hög är varaktigheten kort.

Den laminära flamhastigheten för blandningar av väte och metan ligger mellan hastigheterna för de enskilda ämnena. För att veta vad den laminära hastigheten är i en motor skulle värden för $\lambda = 2$ behövas. Det här är hög λ för en mager förbränning, och har inte efterforskats ännu. För en rik blandning är förbränningen säkrare och stabilare, så detta föredras i vanlig operation av en motor, speciellt i mindre storlekar. Profilen på en laminär flamfront är jämn, och beror av bränslets utsläppshastighet mer än något annat. Hur den laminära flamhastigheten ändrar vid olika mängder väte har undersökts empiriskt. I Hermanns forskning konstaterades att flamhastigheten ökar för ökande andel väte i bränslet, vilket överensstämmer med teorin. I figur 14 kan utläsas att den högsta hastigheten uppnåddes vid maximal vätehalt, 40 mol-% väte vid $\phi = 1.1$. Detta motsvarar ungefär 40 vol-% väte vid $\lambda = 0.9$. Grafen sträcker sig inte till det λ -värde som kommer att användas i experimenten, men visar klart att trenden är att mera väte ger en högre förbränningshastighet, och en klar ändring åstadkoms. (Hermanns, 2007)

Hur den laminära lågan framskrider vid stökiometrisk förbränning i motorn har undersökts via experiment. Här tillsätts en del väte, 10, 20, 30, 40 mol-%, och detta ökar som förväntat på lågans hastighet. Ökningen var i detta experiment linjärt, vilket överensstämmer med Hermanns experiment med varierande λ . (Yu, 1986)

Undersökning av både experimentell data och simulationer visar att både den laminära och turbulenta flamhastigheten ökar vid ökande mängd väte i naturgas. Testerna visar att värmefrigörningstiden och flamhastigheten ökar relativt linjärt upp till ca 30 vol-% väte, varefter ökningen minskar något. (Wang, 2010)

Det som kommer att reglera förbränningshastigheten inne i motorn är den turbulenta flamhastigheten. Denna beror av den laminära flamhastigheten men inte på ett trivialt sätt. Det är klart att om den turbulenta flamhastigheten ökar så ökar även den laminära. Profilen av en turbulent flamfront är ”skrynklig”, med andra ord finns det virvlar (eng. eddy) på flamfronten. Detta gör att flamman har större kontaktyta till bränslet, vilket påskyndar förbränningen. Den turbulenta flamhastigheten i en förbränningsmotor är runt 20 m/s, alltså många gånger högre än den laminära hastigheten. Denna hastighet har stor inverkan på värmefrigivningshastigheten (eng. heat release rate, HRR). Det vanliga sättet att undersöka både den turbulenta och den laminära flamhastigheten är med laser i förbränningskammaren.



Figur 14 Korrelationen mellan den laminära flamhastigheten S_L och luft-bränsle-förhållandet ($\phi=1/\lambda$). Linjerna för 10, 20, 30 och 40 mol-% är representerade av boll, trekant, kryss och plus respektive. (Hermanns, 2007)

En tidigare undersökning har undersökt förbränningshastigheten med laser på en cylindrisk Wärtsilä 34 SG. Resultatet från undersökningen visade att hastigheterna var snabbare än förväntat. En orsak till dessa höga hastigheter antogs vara jetströmmen som injiceras från förgasaren och tillför turbulens till förbränningskammaren. (Duong, 2013)

Ett problem som har kommit fram vid förbränning av rent väte i motorer är att förbränningshastigheten blir för snabb, så att värmen frigörs för snabbt. Det har experimenterats med att injicera vattenånga som regulator för att åtgärda detta och sakta in hastigheten, men då har andra problem uppstått istället (bland annat vattenånga som lämnat kvar i cylindern). (Aarnio, 1997)

4.9 Metantal

Metantal är ett begrepp infört för att kvantisera knackningsresistansen i en motor. En motor ges ofta en metantalsgräns, för att ge riktlinjer om hurdana bränslen som kan köras i motorn. Metantalet för väte är noll, medan det för metan är 100. Metantalet för en blandning med 30 vol-% väte skulle vara runt 70. Vid låga metantal kan en låg-metantalmotor användas, som har andra egenskaper än en standardmotor. Inom Wärtsilä används ett verktyg från AVL som teoretiskt räknar ut metantal. Ett exempel på vad en blandning med 70 vol-% metan och resterande blandning väte skulle ge för resultat visas i figur 15.

AVL Methane 3.2		11 Nov 2014	16:43
Name: 121633			
Contents of gas (Data corrected to 100%):			
H2	:	30.00 %Volume	5.10 %Mass
CH4	:	70.00 %Volume	94.90 %Mass
Methane number = 70.0			
Density (at 0°C, 101.325 kPa)	:	0.52873 kg/m ³	
Gas constant	:	701.59 J/K*kg	
Lower calorific value	:	53702.3 kJ/kg	
Molecular weight of the gas	:	11.8265 kg/kMol	
Stoichiometric air/fuel ratio	:	17.9581 kg Air/kg Gas	
Masspart of C	:	0.71023 kg C/kg Gas	
Masspart of H	:	0.28977 kg H/kg Gas	
Mol. mass for THC corr. to C1	:	16.0430 kg/kMol	

Figur 15 AVLs metantalkalkyleringsprogram s resultat för 30 vol-% väte i naturgas.

4.10 Avgaser

4.10.1 Kväveoxider

Kväveoxider (NO_x) är en av de största och noggrannast reglerade utsläppen för gas- och dieselmotorer. Inom marina sektorn träder IMO-TIER III i kraft år 2016, vilket skulle göra att strängare utsläppsgränser införs. Dessa reglerar nivån av NO_x -utsläpp som tillåts för fartyg byggda efter detta datum. För äldre fartyg finns tidigare IMO-TIER-gränser. (International Maritime Organization)

De kväveoxider som bildas vid förbränning är NO (kvävemoxid) och NO_2 (kvävedioxid). Kvävet kommer från förbränningsluften. Kväveoxiderna är starkt begränsade via lag eftersom de påverkar ozonbildningen både i troposfären och stratosfären samt bildar sura regn. Den största andelen av NO_x är NO. NO kan bildas på två olika vägar: Zeldovich-NO (Thermal NO) som bildas vid höga temperaturer. På grund av den höga aktiveringsenergin kan Zeldovich-NO undvikas (till stora delar) av att hålla temperaturen i förbränningskammaren låg. Detta sköts oftast med ett ökat luftdrag genom motorn, alltså högre lambda. Den andra reaktionen som resulterar i NO heter Fenimore-NO. Denna reaktion bildar NO genom att en CH-radikal reagerar med kvävet och kräver därför lägre temperaturer (händer redan vid 1000 K). Fenimore-NO är vanligare i förbränning med lägre lambda (mera bränsle per luft) och är svårare att förutse och undvika. (Warnatz, 1999)

Man kan endera använda primära metoder (undvika att NO_x uppstår i förbränningsprocessen) eller sekundära metoder (avlägsna utsläppen efter förbränning) för att minska på NO_x -utsläppen. De primära metoderna är i grund och botten att sänka temperaturen i cylinder för att undgå Zeldovich-NO, endera genom att lägga till inerta gaser i förbränningen eller genom att öka luftgenomspolning i cylindern. En metod som kan användas är att spruta in vatten med bränslet. Vattnet sprutas för högsta effekt på flamfronten, eftersom största delen av NO_x -utsläppen formas där. Vattnet sänker temperaturen på förbränningen. Denna metod kan ge upphov till ökad bränsleförbrukning, högre driftskostnader samt ökad korrosion. NO_x -utsläpp på en dieselmotor är betydligt större än på en gasmotor, därför har det undersökts mera på diesel än gas. (Aarnio, 1997)

Som sekundär metod kan nämnas Wärtsiläs NOR (NO_x -reducerare) SCR (selective catalytic reduction, selektiv katalytisk reduktion). Denna använder urea som

katalysator för att omvandla NO_x-utsläppen i avgaserna till kväve. (Wärtsilä environmental technologies, 2015)

4.10.2 Svaveloxider

Svaveloxider (SO_x) bildas från svavel i bränslet eller smörjoljan om sådan kommer in i förbränningskammaren. Svaveloxider är en bidragande orsak till sura regn. Eftersom det inte finns svavel i naturgas i någon större utsträckning borde detta inte uppstå i gasmotorerna, därför kommer detta inte att behandlas i rapporten.

4.10.3 Kolväten

Kolväteutsläpp, THC (eng. total hydrocarbons, totala kolväteutsläpp) är den del av avgaserna som har åtminstone en kolatom och en väteatom, bl.a. metan. Denna är en kraftig växthusgas. Dessa föreningar är sådana som egentligen borde ha brunnit upp i förbränningskammaren, men som på ett eller annat sätt undvikit detta. Det kan vara endera kvävning, det vill säga att lågan i förbränningskammaren släckts av lokalt för mycket bränsle, eller att bränsleblandningen är för mager för att antändas, eller att bränslet aldrig nått förbränningskammaren, så kallat methane slip. Eftersom detta på samma gång är bortslösat bränsle försöker metanutsläppen minskas.

4.11 Wärtsilä 34 DF och SG

En Wärtsilä 34 SG med standardinställningar är en Millermotor med högt kompressionsförhållande som använder naturgas som bränsle. Vanlig drift går på endera 720 eller 750 varv per minut. Den har en cylinderdiameter på 340 mm, och en slaglängd på 400 mm. Den antänds med ett tändstift. Olika motorkonfigurationer finns, från 6L (radmotor med sex cylindrar) till 20V (v-motor med tio cylindrar per bank).

Den har en medeleffekt på 500kW/cylinder, så att en 6L-motor producerar runt 3 MW. (Wärtsilä Power plants, 2013) Båda motorerna används till både marin- och kraftverksindustrin.

En 34 DF har samma energiproduktion, slaglängd och cylinderdiameter som SG-motorerna. Största skillnaden mellan motorerna är att DF antänds med en pilotinsprutning av diesel, och kan även använda diesel som bränsle. Kompressionsförhållandet är högre än på SG. (Wärtsilä Ship Power Technology, 2013)

Motorerna som används i testerna som hör till denna rapport finns i Wärtsiläs motorlabb i Vasa. Både en 34 SG-motor och en 34 DF-motor användes. Dessa motorer har flera justeringsmöjligheter än en standardmotor, och de är också byggda för att klara av högre cylindertryck och -temperaturer.

4.12 Bränsle

Den LNG som används är tillverkad från rysk naturgas, sammansättningen är listad i tabell 2. Med ett metaninnehåll på 97,5% är gasen renare än de flesta andra naturgaser som används inom industrin. Metantalet är 91,8, räknat med verktyget i tidigare kapitel. Eftersom gasen är så ren ger den upphov till få andra utsläpp än de man förväntar sig från ren metanförbränning. Vätet som användes beställdes från AGA. Det levererades i tryckflaskpaket, med 1 kg väte per flaska. Genom att koppla flaskorna i serie sågs det till att ett tillräckligt flöde kunde åstadkommas.

Tabell 2 Sammansättningen av naturgasen som användes i testerna.

Sammansättning		
Väte, H ₂	mol-%	0
Metan, CH ₄	mol-%	97.5
Etan, C ₂ H ₆	mol-%	1.8
Propan, C ₃ H ₈	mol-%	0.18
(n-)Butan, n-C ₄ H ₁₀	mol-%	0
i-Butan, i-C ₄ H ₁₀	mol-%	0.038
(n-)Pentan, n-C ₅ H ₁₂	mol-%	0.000
i-Pentan, i-C ₅ H ₁₂	mol-%	0.0058
Hexan, C ₆ H ₁₄	mol-%	0.001
Koldioxid, CO ₂	mol-%	0.000
Kväve, N ₂	mol-%	0.4
Syre, O ₂	mol-%	0.00
Metantal		91.8

5. Tester

5.1 Hypoteser

Före testerna gjordes en testplan för att veta hur mycket bränsle som skulle beställas samt hur mycket tid som skulle reserveras för testerna. Testerna planerades så att maximalt antal parametrar som möjligt kunde testas, för att se vilka som hade störst inverkan på prestandan. Testplanen var gjord med reservation för ändringar.

Det antogs att den största ändringen som kommer kunna observeras i testerna var att varaktigheten på förbränningen förkortas. Detta skulle leda till ökad NO_x-formation, speciellt Zeldovich-NO, på grund av de höjda temperaturerna i cylindern, om inte timingen ändrades. En annan hypotes var att metanutsläppen kunde minska, eftersom blandningen med väte är mera lättantändlig än ren naturgas. De andra kolbaserade utsläppen antogs minska, på grund av att mindre kolbaserat bränsle lades in i motorn. Det som antogs begränsa mängden väte som kunde matas in i motorn var kraftig knockning. Eftersom väteets egenskaper som bränsle var oklart krävdes tester för att fastställa var gränsen gick.

5.2 Planerade tester

5.2.1 *Wärtsilä 34 SG*

Planerna för testerna planerades för att få en så överskådlig bild som möjligt av hur vätet fungerar i motorerna. I tabell 3 finns en översikt av de planerade testpunkterna.

Först planerades motorn köras varm, för att se till att förbränningen är stabil då testerna börjar köras. Därefter körs referenstester, alltså tester med samma inställningar som de planerade testerna men utan väte, endast LNG. Målet med testpunkt 1 är att få reda på den maximala andelen väte som kan köras i motorn utan att förändra inställningarna. Denna punkt mäts genom att mata in en ökande andel väte, och mäta

utsläpp och prestanda med jämna mellanrum. I början ökas vätemängden med flera procentenheter mellan varje mätning, för att sedan höjas med färre procentenheter då det visar att gränsen närmar sig. Hypotesen är att knackning kommer att vara det som begränsar vätemängden i blandningen.

Efter att den maximala vätemängden hittats är målet att hitta hur mycket belastning som motorn kan köras med 30 % väte i bränslet. Denna gräns fastställdes i projektets början. Den här punkten bestäms med hjälp av informationen som har framkommit i de tidigare testpunkterna.

Tester med avancerad Miller-timing planerades så att vi ändrar på timingen av inspruts- och utsugsventilerna till cylindern och på så sätt påverkar hur mycket genomspolning som finns i motorn, för att se hur förbränningen påverkas av mera luftgenomdrag. Eftersom denna operation sänker temperaturen i motorn borde det bli möjligt att höja mängden väte i bränslet. På en standardmotor kan detta inte justeras.

Testning av en ändring av tändningstidpunkten planerades för att se om en förändring ger upphov till bättre förbränning. Eftersom bränslet kommer att brinna snabbare i våra tester än i vanliga fall förväntas det att tidpunkten får tidigareställas ganska mycket.

Efter att dessa olika punkter har körts med full last, kommer en del punkter att köras på nedsatt last, nämligen 75 och 50 %. Eftersom förbränningen då sker vid lägre temperaturer och lägre tryck borde en ökad mängd väte kunna användas.

Efter att motor har körts med standardkompressionsförhållande på 11 kommer ett lägre förhållande på 10 att testas på motorn. Eftersom CR 10 är vanligt i lågmetantalsmotorer borde förbränningen vara enklare att kontrollera och större andel väte borde kunna matas in. Efter att tester har gjorts på full last med dessa inställningar kommer också nedsatt last att testas, nämligen 90 och 50 %.

Tabell 3 Testplan på Wärtsilä 34 SG

Nr	Mening med testet
1	Referens med full belastning
2	Maximal mängd väte i bränslet utan justeringar
3	30 % väte i bränslet
4	Avancerad Miller
5	Justerad tändningstidpunkt
6	Minskad last, 75 %
7	Minskad last, 50 %
8	Kompressionsförhållande 10
9	Kompressionsförhållande 10, nedsatt last (90 och 25 %)

5.2.2 Wärtsilä 34 DF

Testplanen för 34 DF-testerna syns sammanfattat i tabell 4. Den är kortare än den för motsvarande SG-motor eftersom det bedömdes att det inte fanns behov av att köra alla testade punkter en gång till, utan bara de som visar skillnaden mellan de två motorerna och till en viss del komplettera de testpunkter som kördes på den andra motorn.

I denna testplan körs det först referenser som i det tidigare testet. Sedan körs motorn på full last med ökande andel väte i bränsle, på motsvarande sätt som tidigare, utan att ändra inställningarna till LNG-körningarna. Sedan körs motsvarande punkter men så att motorinställningarna ändras och blir närmare idealinställningarna. Efter detta görs motsvarande operationer för lägre belastning, här på 75 %.

Tabell 4 Testplan för 34 DF

Nr	Meningen med testet
1	Referenstester
2	Full belastning, maximal mängd väte
3	Optimala inställningar med samma mängd väte
4	Nedsatt last, 75 %, maximal mängd väte
5	75 % last, optimala inställningar

5.3 Utfört test

5.3.1 Wärtsilä 34 SG

Tabell 5 visar ett urval av testerna som blev körda. Testerna började med att köra motorn varm, så att en så stabil förbränning som möjligt kunde åstadkommas. Observera att alla vätemängder mäts i volymprocent, vol-%. Som jämförelse betyder 30 vol-% ungefär 5 massprocent, m-%.

Referenspunkterna mäts för att få ett referensvärde med annars samma inställningar, men inget väte i bränslet. Dessa kördes på olika belastning och andra inställningar. Alla punkter går inte att få en referenspunkt till, exempel kan man inte köra med så sen tändning som vi körde i fallen med hög vätehalt om man använder endast naturgas.

De första punkterna, a1 till a4, kördes med standardinställningar på motorn med ökande andel väte i bränslet. Orsaken att dessa tester kördes var för att få en bild av vad som händer om bränslet ändras utan att inställningarna justeras. Efter att den kritiska mängden väte som kunde köras på dessa inställningar hittats genom att öka vätemängden trots allt kraftigare knackning ändrades sedan inställningarna för att få en optimalförbränning. Efter att vissa justeringar gjorts, främst att tändningstidpunkten senarelades, kunde ytterligare väte tilläggas till bränslet.

Tester gjordes med avancerad Miller-timing, så att ytterligare väte kunde tilläggas. En referenskörning med standardtändningstidpunkt och utan väte fördes först. I test b1 kördes motorn med avancerad Miller, sen tändningstidpunkt och hög vätehalt.

I första referenspunkten ändrades Millertimingen så att mera luft kom in i motorn. På detta sätt kunde mängden väte ökas igen, i punkt b1 var vätemängden mellan 40 och 45. På grund av ostabilt flöde från blandstationen kunde detta inte stabiliseras.

I nästa referenspunkt kördes motorn på lägre belastning, närmare bestämt 75 %. I punkt c1 och c2 användes dessa inställningar, och i c2 uppnåddes rekordhög mängd väte, runt 60 vol-%. Denna mängd begränsades inte av motorn utan av blandningstationens kapacitet.

De sista referenspunkterna och d1 till f3 kördes på ett annat kompressionsförhållande, standardmotorns 11 ändrades till 10. Här kördes motsvarande punkter som a-serien, alltså tillsats av väte utan justering, och sedan även en punkt med NOx-justering och en serie med 90 % last.

En del testpunkter kördes inte; punkten med 30 vol-% väte kördes inte, eftersom mängden väte som kunde matas in utan justeringar var 28 vol-%. Tändningstidpunkten justerades under testerna istället för att ha detta som en skild testpunkt, eftersom redan de första testerna visade att ändringen i förbränningstid var stor. Nedsatt last på 50 % kördes aldrig, eftersom vätet tog slut samt att mängden väte vid 75 % last var ytterst hög redan. Maximala mängden väte på nedsatt last kunde inte köras eftersom blandstationen inte kunde leverera tillräckligt högt flöde.

Tabell 5 De utförda testerna på 34 SG

	Belast- ning	H2	Miller	Tändnings- tidpunkt	CR	Kommentar
REF	100	0	STD	STD	11	
a1	100	11.4	STD	STD	11	Tillsats av väte utan justering
a2	100	20	STD	STD	11	Tillsats av väte utan justering
a3	100	24	STD	STD	11	Tillsats av väte utan justering
a4	100	28	STD	STD	11	Tillsats av väte utan justering
a5	100	28	STD	STD -11	11	NOx-minskning
a6	100	40	STD	0	11	Tändningstidpunkt 0
REF	100	0	AVC	STD	11	Miller utan väte
b1	100	45	AVC	STD -14	11	Miller med väte
REF	75	0	STD	STD	11	Nedsatt last, 75 %
c1	75	30	STD	11	11	Nedsatt last, 75 %, max väte utan justeringar
c2	75	60	STD	10	11	Nedsatt last, 75 %, begränsad av väteflöde
REF	100	0	STD	STD	10	CR 10
d1	100	6	STD	STD	10	Tillsats av väte utan justering
d2	100	10	STD	STD	10	Tillsats av väte utan justering
d3	100	18	STD	STD	10	Tillsats av väte utan justering
d4	100	28	STD	STD	10	Tillsats av väte utan justering
d5	100	40	STD	STD	10	Tillsats av väte utan justering
d6	100	40	STD	STD-13	10	NOx-justering
REF	90	0	STD	STD	10	Nedsatt last, 90 %
e1	90	43	STD	STD	10	Nedsatt last, 90 %, förtändning / knackning
e2	90	45	10	STD-8	10	Nedsatt last, 90 %, justerad tändningstidpunkt
STD: standardvärden vid körning. AVC: Avancerad REF: referenskörning för att få jämförelsevärden, utan väte.						

5.3.2 Wärtasilä 34 DF

En sammanfattning av de testpunkter som kördes på 34 DF-motorn kan ses i tabell 6. Motorn kördes varm på diesel för att få en stabil förbränning, sedan byttes den till gasdrift. Referenspunkter kördes på de inställningar som tester utfördes, så att en jämförelse kunde fås till stånd.

Den första serien som kördes var ökad vätemängd i bränslet på 100 % belastning, för att se hur mycket väte som kunde tillsättas utan att ändra på inställningarna i motorn. Vid denna väteprocent kördes sedan korrigeringar på motorn för att se hur förbränningen kunde förbättras.

Efter de första punkterna på 100 % belastning minskades belastningen till 90 %. Körningen på den här belastningen undersöktes med ökande mängd väte, och med olika inställningar.

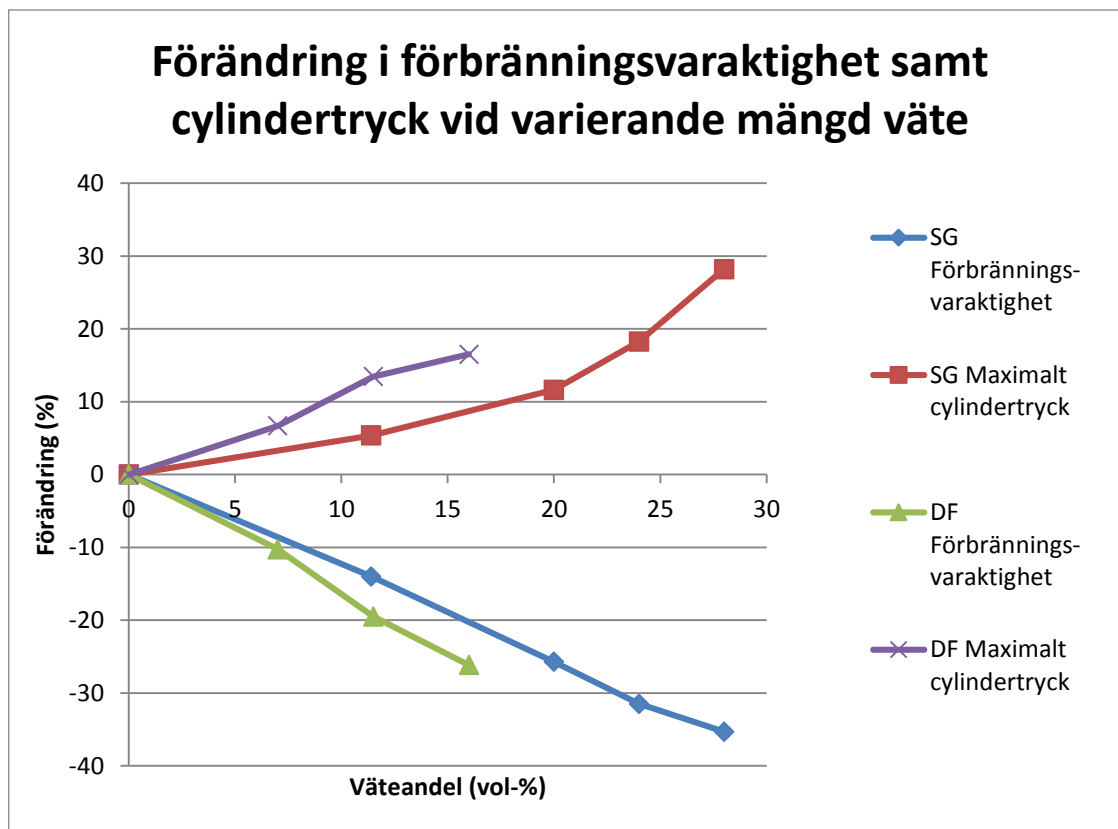
Tabell 6 Utförda tester på DF

	Belast- ning	H2 (vol-%)	Pilot-timing	Pilot- varaktighet	Kommentar
ref	100	0	STD	STD	Referenspunkt
a1	100	7	STD	STD	Tillsats av väte utan justeringar
a2	100	11.5	STD	STD	Tillsats av väte utan justeringar
a3	100	16	STD	STD	Tillsats av väte utan justeringar
a4	100	16	STD+20%	STD-25%	Justerad pilotvaraktighet, timing
a5	100	16	STD+20%	STD-50%	Justerad pilotvaraktighet , timing
a6	100	16	STD+20%	STD- 75%	Justerad pilotvaraktighet , timing
a7	100	16	STD+20%	STD	Justerad pilottiming
a8	90	20	STD	STD	Nedsatt last, 90 %
a9	90	25	STD	STD	Nedsatt last, 90 %
a10	90	30	STD	STD	Nedsatt last, 90 %
a11	90	30	STD+20%	STD-75%	Nedsatt last, 90 %
a12	90	35	STD+20%	STD-75%	Nedsatt last, 90 %
Ref	90	0	STD	STD	Nedsatt last, 90 %, referenstest
b1	90	42	STD-95%	STD-75%	Nedsatt last, 90 %, justerad pilottiming, varaktighet
b2	90	44	STD-97%	STD-75%	Nedsatt last, 90 %, justerad pilottiming, varaktighet
b3	100	20	STD-50%	STD-65%	100 % last, justerad pilottiming, varaktighet
STD: standardvärden vid körning. REF: referenskörning för att få jämförelsevärden, utan väte.					

6. Testresultat

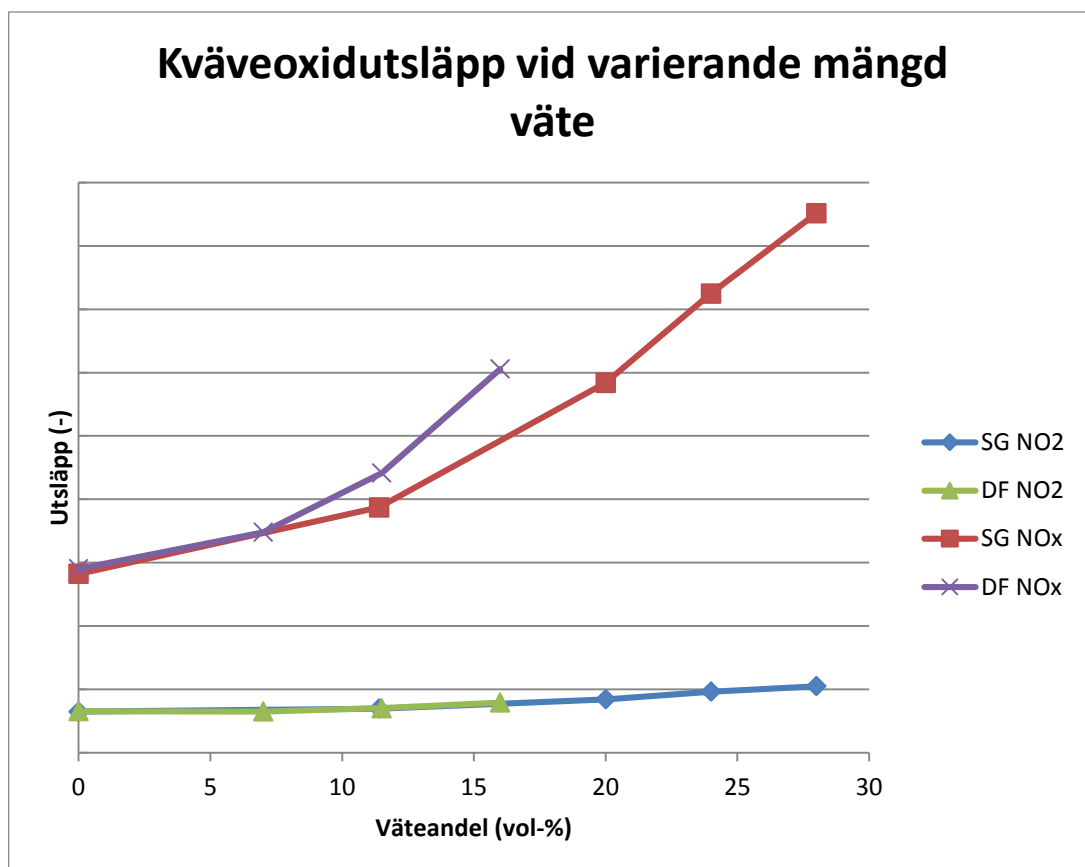
Resultaten som presenteras är ett utdrag av de resultat som testerna producerade. Dessa är de som visar på ett tydligt resultat, och som har relevans för forskningen och forskningsfrågorna. Eftersom en stor mängd test utfördes, kommer inte alla punkter att analyseras i denna rapport. En stor del av testerna utfördes för att kunna bekräfta att SG- och DF-motorerna reagerar liknande på bränslet.

Figur 16, figur 17 och figur 18 visar förändringar i 34 SG- och DF-motorerna under punkterna där endast bränslet ändrades, alltså att väteandelen ökades utan andra justeringar. Figur 16 visar förändringen i förbränningsvaraktighet samt cylindertryck vid varierande mängd väte för både SG- och DF-motorerna. Dessa värden är medeltal av värdena för de enskilda cylindrarna. Cylindertrycket för båda motorerna stiger kraftigt vid ökning av vätemängden, vilket ses speciellt i resultaten från SG-motorn. Här är stigningen i det närmaste exponentiell. Det här beror på att energin från förbränningen frigörs under fel tidpunkt, vilket i sin tur beror på den andra parametern som är avbildad i figuren, förbränningens varaktighet. Eftersom tidpunkten bränslet antändes i testet var konstant, men tiden energin frigjordes på var mycket kortare följer det att större del energi frigörs före det är optimalt för energiutvinning. Av detta följer att trycket och temperaturerna blev högre än referenspunkterna. På en standardmotor skulle dessa punkter inte ha gått att köra eftersom cylindertrycket blir för högt. Minskningen i förbränningsvaraktigheten är i det närmaste linjär och beror på att förbränningshastigheten ökar för blandningen. Utvecklingen är likadan i både SG- och DF-motorerna.



Figur 16 Förändring i cylindertryck och förbränningsvaraktighet på både SG och DF under ökningen av väteandelen i bränslet.

I figur 17 ses NO_x -utsläppen, samt specificerat NO_2 -utsläppen vid ökad vätemängd. Både testresultaten från 34 SG och 34 DF är inkluderade. NO_2 -linjerna är i det närmaste identiska, och NO_x -nivåerna stiger i båda fallen snabbt. Eftersom NO_2 -nivån endast ökar lite skulle det betyda att ökningen i NO_x -utsläpp beror på NO -nivå. Detta tyder på att NO är betydligt känsligare för denna förändring än NO_2 , vilket antas bero på att ökad mängd väte i bränslet ger en högre temperatur inne i cylindern, så att mera Zeldovich- NO bildas.

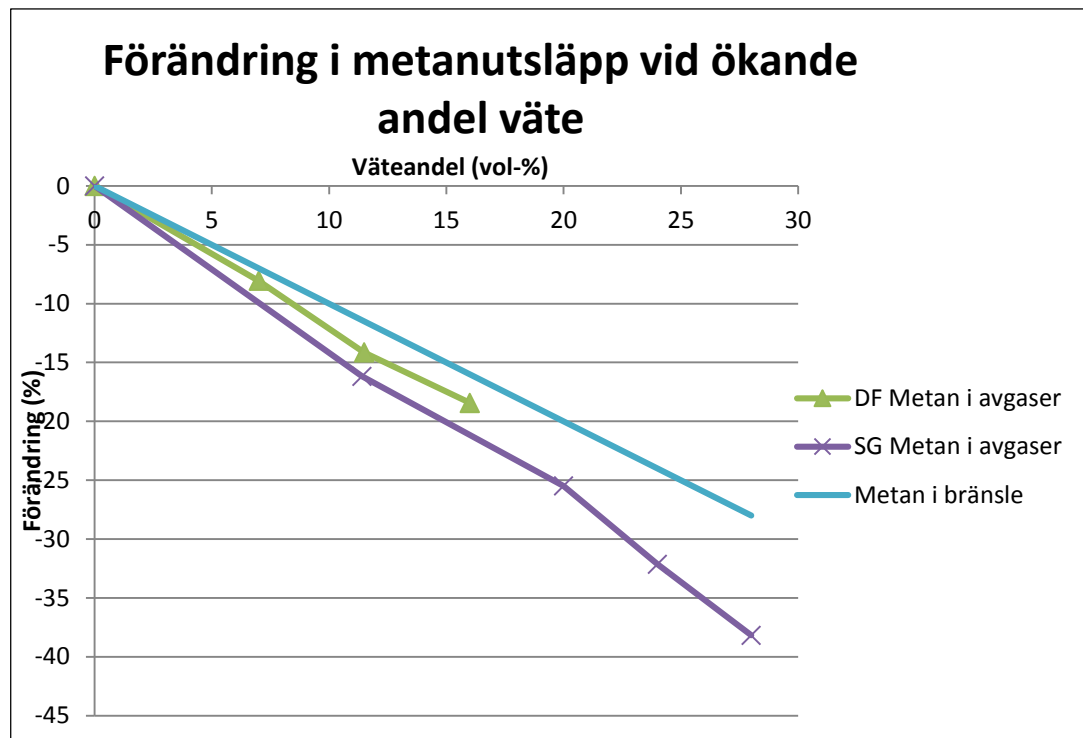


Figur 17 Kväveoxidutsläpp, både totala och kvävedioxidutsläpp, på både DF- och SG-motorerna vid ökad mängd väte i bränslet.

En översikt över kolväteutsläppen från de samma punkterna ses i figur 18 nedan. Här jämförs förändringen av metan i bränslet för både SG- och DF-testerna med förändringen i den inmatade metanmängden. Ur figuren kan man se att utsläppen minskar mera än vad den inmatade metanmängden minskar, speciellt i SG-motorns fall. Det att metanutsläppen går ner kan bero på att vätet gör att bränslet brinner lättare och därför inte kvävs lika mycket, samt att det är mera lättantändligt, och därför i lägre grad kommer genom cylindern oförbränt. Figuren visar att metanutsläppen kan minskas genom att tillsätta väte i bränslet, och i denna graf är förändringen linjär, så att en högre mängd väte ger en större minskning i metanavgaser. Speciellt för SG-motorn minskar avgaserna.

Det att vätetillsatsen inte ger lika tydlig effekt på DF-motorns metanavgaser kan bero på att metanutsläppen uppkommer på olika ställen i de olika motorerna. Om utsläppen

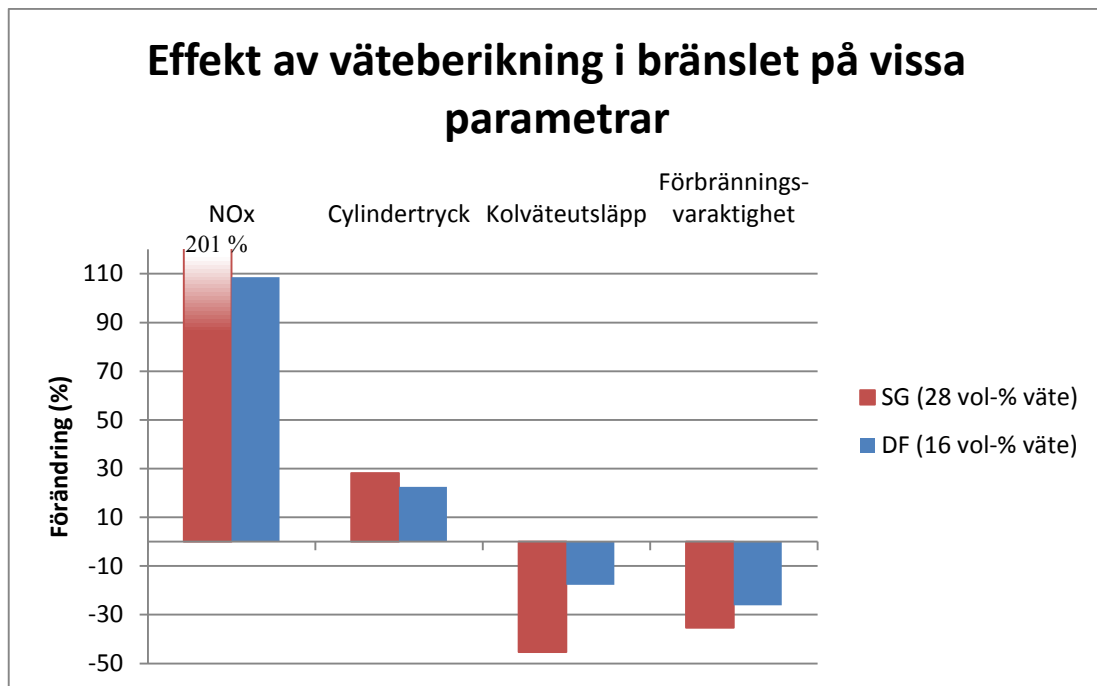
inte beror på att bränslet går genom förbränningskammaren utan att förbrännas så kommer inte ett vätetillskott att hjälpa situationen.



Figur 18 Metanutläppen från båda motorerna vid förändring av väteandelen i bränslet

I figur 19 jämförs effekten av väteberikningen i bränslet för både SG- och DF-motorerna. Här har endast vätemängden i bränslet ändrat, så att inga inställningar justerats. På SG-motorn har 28 vol-% väte tillagts medan DF-motorn har 16 vol-% väte i bränslet, vilket var punkterna där de respektive motorerna började knacka. I figuren ses förändringen i förhållande till den respektive referenspunkten utan väte.

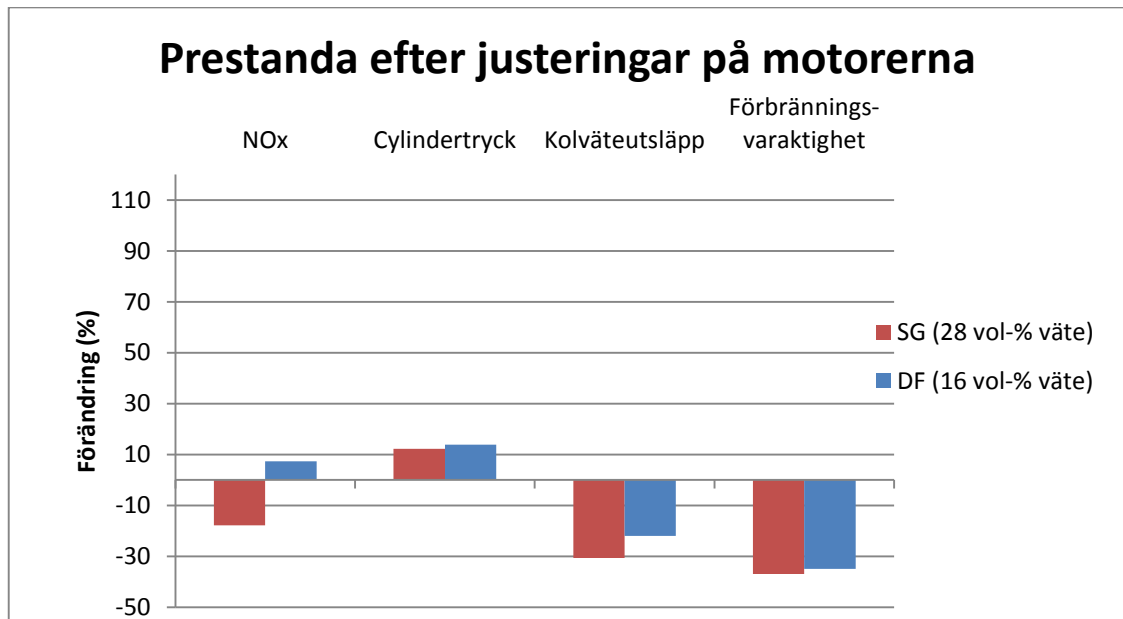
Eftersom SG-motorn hade mera väte inblandat blev också effekterna tydligare i denna. Det som kan ses ur figuren är att de olika motorerna reagerade likadant med dessa parametrar. Denna figur är en sammanfattning av figur 16, figur 17 och figur 18.



Figur 19 Jämförelse mellan effekten av väteberikning av bränslet i både SG- och DF- motorerna

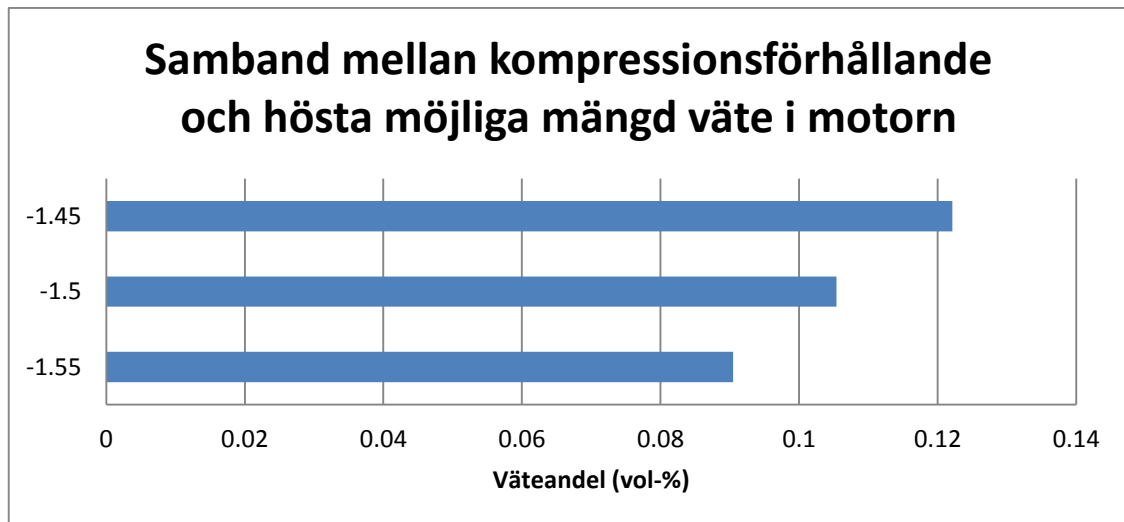
I figur 20 ses en jämförelse mellan motsvarande punkter som ovan, fast med justeringar på motorerna så att värmefrigivningen ska ske på en mera optimal tidpunkt. Dessa testvärden jämförs med referenspunkterna för vardera motorn. Största skillnaden är NO_x-utsläppen, vilka är mycket lägre för båda motorerna. Justeringarna till motorn gjordes med tanke på dessa utsläpp, så att samma nivå som före vätetillägget skulle uppnås med justeringarna. Det framgår ur figuren att justeringen inte blev perfekt, eftersom SG-motorns utsläpp är något lägre än referensförningen, och DF-motorns utsläpp något högre. Cylindertrycken höjdes mindre än i ojusterade fallet, vilket möjliggör en stabil och hållbar körning av motorn utan lika stort slitage. En ökning finns ändå, vilket tyder på att fast värmefrigivningen är närmare den optimala tidpunkten så förändras förbränningen så att slitaget kan öka på motorn. Kolväteutsläppen är mindre än i referenskörningarna på båda motorerna, men i SG-motorns fall är minskningen inte lika stor som före justeringarna. DF-motorn, däremot, har en större minskning än utan justeringar. I fallet utan justeringar var fallet omvänt, alltså att SG-motorns THC-utsläpp var minskade mera än vätetillägget, men efter

justeringar var alltså fallet att DF-motorn hade mera större minskning. Förbränningsvaraktigheten har på samma sätt som i tidigare graf förkortats. För SG-motorn är minskningen i det närmaste samma som utan justeringar på motorn. På DF-motorn är minskningen större, nästan 10 procentenheter större.



Figur 20 Jämförelse mellan SG- och DF- motorerna efter justering av motorerna

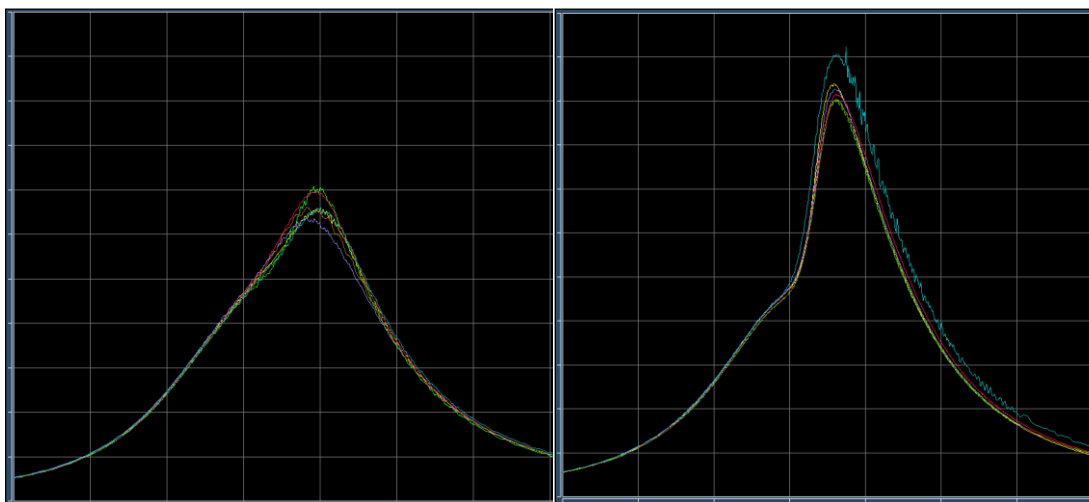
I figur 21 ses sambandet mellan vätemängd och kompressionsförhållandet i motorn. Enligt denna graf skulle högre kompressionsförhållande leda till lägre möjlig mängd väte, vilket stämmer med hypoteserna som ställdes tidigare i testet. Eftersom dessa tester kördes på två olika motorer, där första punkten i grafen kördes på DF-motorn och de andra två på SG-motorn, kan resultaten endast ses som riktgivande. Om alla kompressionsförhållanden hade körts på samma motor skulle resultaten vara mera pålitliga. Utvecklingen är ändå så klar att följande slutsats kan dras: kompressionsförhållandet påverkar maximala mängden väte i motorn mycket.



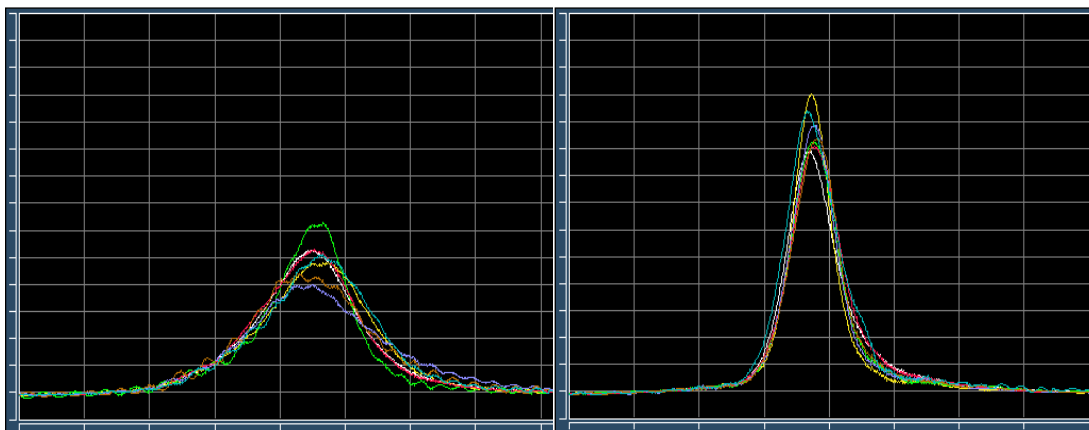
Figur 21 De olika kompressionsförhållandena och maximala mängden väte som kunde matas in utan förändringar i motorns inställningar.

I figur 22 ses cylindertrycken på 34 DF-motorn vid nedsatt last för en cykel, utan väte till vänster i figuren och med väte till höger i figuren. På y-axeln är trycket och på x-axeln motorns gradtal. De olika linjerna är de enskilda cylindrarnas tryckutveckling. Förändringar kan observeras främst i att intensiteten på tryckutvecklingen ökar, så att kurvan blir kortare men med större amplitud. Detta beror på att vätet försnabbar förbränningen. Här är förbränningen justerad så att den inträffar på rätt tidpunkt, vilket kan ses genom att toppen på kurvan befinner sig på ungefär samma ställe i de olika figurerna. I den senare figuren kan också en sågtandad figur observeras, på en av cylindrarna. Detta är knackning, vilket tillsammans med förtändning har begränsat mängden väte som kan tillsättas till förbränningen.

Värmefrigöringstakten från motorn kan ses i figur 23, utan tillsatt väte till vänster och med väte till höger, samma mätpunkter som figur 22. Linjerna motsvarar de enskilda cylindrarnas värmeutveckling under en cykel. Motsvarande saker kan observeras här som i de föregående graferna, med snabb utveckling och stor amplitud.



Figur 22 Cylindertrycken på DF-motorn med nedsatt last utan väte respektive med tillsatt väte



Figur 23 Värmefrigöringstakten på DF-motorn på nedsatt last utan väte i bränslet respektive med tillsatt väte i bränslet

En översikt över de olika parametrarna som påverkar eller påverkas av förbränningen är presenterad i tabell 7. De poster som har röda prickar är de som var negativt påverkade av en vätetillsats i bränslet medan de gröna fyrkanterna visar en positiv effekt. Ur tabellen kan uttydas att SG-motorn med 28 vol-% väte och justeringar inte har begränsande faktorer. Det mest anmärkningsvärda är den snabbare värmefrigöringen och de lägre THC-utsläppen, som har nämnts tidigare i detta kapitel. Utan justeringar är situationen en annan. Cylindertrycken är för höga för att fungera på en standardmotor, och NO_x-utsläppen är väldigt höga. Värmefrigöringen är i samma klass som efter justeringarna, men eftersom den här sker för tidigt blir det en negativ effekt. Det enda som är bättre före justeringarna jämfört med efter är THC-utsläppen.

Tabell 7 Översikt av några motorparametrars resultat på förbränningen

Motorparameter	SG-motor, 28 vol-% väte, utan justeringar	SG-motorn, 28 vol- % väte, med justeringar
NOx	● ● ●	●
THC	■ ■ ■	■ ■
Knackning	● ●	●
Förtändning	● ●	
Värmefrigörning	● ●	■ ■
Cylindertryck	● ● ●	●
<p> ● ● ● – kraftigt negativa resultat, Begränsande faktor för motorns användning ● ● – negativa resultat, nära begränsande faktor ● – negativa resultat men inte begränsande faktor ■ ■ – positiva resultat ■ ■ ■ – mycket positiva resultat </p>		

7. Diskussion

Tidigare forskning tyder på att ett vätetillägg till naturgas i en motorförbränningsmotor försnabbar förbränningen, ökar verkningsgraden och ökar NO_x-utsläppen. Tester visar att en Wärtsilä 34 SG- och DF-motor reagerar på motsvarande sätt. Den tydligaste förändringen i förbränningen vid tillsats av väte var att förbränningshastigheten ökade och förbränningsvaraktigheten minskade. Förändringen var direkt beroende av mängden väte som tillsattes till naturgasen. SG- och DF-motorn reagerade liknande på en vätetillsats, vilket tyder på att antändningsmekanismen inte i stor utsträckning påverkar förbränningen med väteberikat bränsle. Större effekt verkar kompressionsförhållandet i motorn ha, där ett högre kompressionsförhållande ger en lägre vätetålighet. Detta kunde undersökas närmare genom att ha en DF- och en SG-motor med samma kompressionsförhållande. Här testades motorerna med olika kompressionsförhållanden vilket gjorde att de inte kunde jämföras sinsemellan.

Det går att köra relativt hög andel väte i Wärtsiläs motorer, till och med i utan justeringar på motorn. Det här tyder på en stabil förbränning. Eftersom testerna med nedsatt last tillät upp till 60 vol-% väte är det möjligt att 100 % väte kunde köras bara lasten tas ner tillräckligt. Eftersom det här inte ingick i testplanen testades det inte, men det visar ändå på den potential väte har som bränsle, och på robustheten av Wärtsiläs motorer.

Det framkom av testerna att det är av största vikt att motorn har korrekta inställningar vid förändring av bränslet, för att undvika att NO_x-nivåerna stiger. De NO_x-nivåer som uppnåddes då motorn kördes utan justeringar var ofördelaktigt höga. En fördel till Wärtsilämotorer framför de forskningsmotorer som har behandlats i början av rapporten är att Wärtsilämotorerna kan justeras så att NO_x-utsläppen minskas drastiskt. Detta visar att Wärtsilämotorer har en bättre möjlighet att visa hur de framtida väte-naturgasmotorerna borde se ut, och kan justeras till att fungera i det närmaste optimalt på en vätgasblandning relativt enkelt.

Om en motor ska köras på en gas-väteblandning borde det ses till endera att blandningen är homogen och har en konstant mängd väte i sig eller att motorn kan

ställas in kontinuerligt beroende på bränslet som används. Det här kan göras manuellt av personal på plats eller genom ett automatiserat system. Om en Wärtsilämotor skulle säljas för bruk på mera än 10 % väte skulle ett lägre kompressionsförhållande rekommenderas. Justeringar på motorn borde göras för varje motor och bränsleblandning specifikt.

Testerna visar att metanutsläppen kan sänkas av att lägga till väte i naturgas. Detta kunde vara ett sätt att minska på utsläppen från Wärtsilämotorerna. THC-utsläpp är ännu inte begränsade via lag och har därför inte undersökts mycket, men en lagförändring kan komma inom nära framtid. Ifall detta sker finns ett relativt enkelt sätt för Wärtsilä att visa hur minskningar kan åstadkommas och ett mera optimalt bränsle kan utvecklas.

I kapitel 2.5 nämndes att en högre andel väte än 25 vol-% leder till en högre säkerhetsklass enligt ICEs standarder. Vätemängder upp till detta värde, och även över, har körts i dessa tester utan att stöta på stora problem. Detta leder till att 25 vol-% kunde tänkas vara en framtida gräns för hur mycket väte Wärtsilä tillåter i sina motorer.

NO₂-utsläppen i testerna verkar inte påverkas i desto större utsträckning av varken en tryckökning eller en temperaturökning. När NO-utsläppen ökade så ökade även NO₂-utsläppen, men inte lika kraftigt. Detta skulle kunna tyda på att NO₂ inte direkt beror av NO-nivån, utan formas i förbränningen oberoende av denna.

Om ett kraftverk skulle designas för detta bränsle från designstadiet skulle säkerhetsåtgärderna ha kunna skötas enklare. Då skulle inte huvar och extra pumpar ha behövts användas, utan en cell med naturligt högt luftombyte och utan antändningskällor i taket skulle kunna byggas. Motorerna i detta kraftverk kunde ha lågt kompressionsförhållande, kontinuerlig analys av det inkommande bränslets kvalitet och även avancerad Miller. På detta sätt kunde höga andelar väte köras i motorn utan högre säkerhetsrisker.

Forskningsfrågorna som ställdes i början av rapporten fick under testerna klara svar.

- Hur påverkas förbränningen av en tillsats av väte i bränslet?

- Förbränningen försnabbas, och beroende av inställningar kan både kväveoxid- och kolväteutsläpp minskas. På grund av den ökade förbränningshastigheten ändrar värmefrigöringstakten och cylindertryckutvecklingen.
- Vilka ändringar ska göras på motorerna för att de ska kunna köras på 30 vol-% väte?
 - Med en marginell minskning i last, eller ett lägre kompressionsförhållande kan en stor mängd väte läggas till i bränslet. En försening av tändningstidpunkten är att rekommenderas.
- Kan Wärtsilämotorer använda väteberikade bränslen i framtiden?
 - Wärtsilä 34 SG och DF kan köra på väteberikade bränslen utan problem, om justeringar görs på motorn och en konstant mängd väte används i bränslet. För att detta ska kunna användas i praktiken behöver systemen runt motorn också fungera på ett säkert sätt. Säkerheten och produktionen samt transporten och förvaringen av vätet kräver noggrann planering.

8. Framtida utsikter

Dessa tester visar på att väte bör gå att använda och tillägga i gasnätverket utan större problem för Wärtsiläs gasmotorer. För att vätetillägg i gas ska fungera felfritt borde ett verktyg utvecklas som kan analysera den inkommande gasen till motorn och automatiskt, direkt göra Anpassningar i förbränningen. Wärtsilä har kommit en bit på denna väg genom att utveckla ett verktyg för att utvärdera hur bra olika kombinationer av gaser fungerar i motorerna, men mycket arbete finns ännu kvar.

För att det ska bli verklighet med att blanda väte i naturgas behövs en utveckling av infrastrukturen för väte samt ett brett engagemang från många håll. För det första bör produktionen av väte effektiviseras och en utveckling av framställningsteknologierna krävs. För det andra behövs en uppdatering av gasnätverket och en utförlig analys av hur det kommer att reagera på högre nivåer väte under längre tid. Som tredje sak behöver gemensamma spelregler bestämmas, speciellt angående den högsta tillåtna förändringen av väte i naturgasen.

En brist i testerna som utfördes för denna rapport var att ingen testning gjordes av att starta motorn på ett väteberikat bränsle, och inte heller varierande belastning. I dessa tester togs väteflödet ner till noll då ändringar i belastningen gjordes, för att den stabila körningen prioriterades. Som framtida tester kunde sådana tester planeras där motorn startas och stängs av med konstant vätemängd, för att simulera hur motorn skulle fungera i fältet med ett dylikt bränsle.

För att dessa tester skulle vara tillförlitliga även med andra gaser än de med endast väte och naturgas kunde andra gaser ha testats med i blandningen. För att få veta om man kunde köra en blandning på väte, kolmonoxid, koldioxid, även kallad syngas (syntetisk gas) och gas kunde dessa två (CO och CO₂) också ha satts till och analyserats. Dessa tester kunde vara till stor nytta i framtiden, så dylika tester borde planeras å det snaraste.

Någonting som inte kunde analyseras ur dessa tester men som kunde vara intressant är förhållandet mellan NO och NO₂ i avgaserna. Tidigare har fokus legat på NO-utsläppen och hur dessa påverkas av förbränning eftersom de har varit en stor del av

speciellt en dieselmotors NO_x-utsläpp, men när dessa kan ställas in i en gasmotor till ganska låga nivåer och kontrolleras ganska lätt blir mängden NO₂ redan en betydande andel av NO_x-utsläppen. Orsakerna till detta skulle vara en intressant forskningsfråga för framtiden.

För att helt förstå hur en vätetillsats påverkar THC-utsläppen borde en noggrannare analys utföras på förbränningen. Eftersom resultaten här visar att olika justeringar på olika motorer ger olika resultat finns det flera faktorer som borde beaktas, inte endast vätemängden i bränslet. Eftersom en minskning i metanutsläpp kunde minska på bränsleförbrukningen kunde detta vara något att studera i framtiden för att uppnå högre verkningsgrad på motorn. Någonting som kunde vara intressant att forska i är hur en mindre mängd väte påverkar utsläppen, och på om man på detta sätt kan nå inbesparningar i bränsleminskning. Utsläppen är ändå relativt låga, så detta är knappast en punkt som kommer att ha en väldigt avgörande roll i bränsleeffektiviteten.

Väteblandning i gas och gasmotorer verkar vara på framfart i världen, och de framtida utsikterna för att väte kommer att tilläggas till en eller flera olika gasnätverk verkar ljusa. För att kunna hantera denna förändring bör Wärtsilä lägga mera energi på vätetestning och se till att alla delprocesser klarar av detta bränsle. Wärtsilä har kommit långt på väg och de tester som analyserats här visar positiva resultat.

Referensförteckning

- Aarnio, P. H. (1997). *Vesiruisikutus NO_x-päästöjen vähentämiskeinona*. Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, polttomoottorilaboratorio.
- Akansu, S. D. (2004). Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures. *International journal of hydrogen energy* 29, 1527-1539.
- Altfeld, K. P. (2013). *Admissible hydrogen concentrations in natural gas systems*. DIV Deutscher Industrieverlag GmbH.
- Bossel, U. E. (2003). The future of hydrogen economy: Bright or bleak? *Cogeneration and competitive power journal*, 29-70.
- Corbetta, G. (February 2015). http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA_Annual_Statistics_2013.pdf. Haettu 8. June 2015
- Coward, H. F.; & Jones, G. W. (1952). *Limits of flammability of gases and vapors*. Washington: Bureau of mines.
- Delorme, A. R. (2009). *Evolution of Hydrogen Fueled Vehicles Compared to Conventional Vehicles from 2010 to 2045*. SAE international.
- Dimpoulos, P. B. (2008). Hydrogen-natural gas blends fuelling passenger car engines: Combustion, emissions and well-to-wheels assessment. *International journal of hydrogen energy* 33, 7224-7236.
- Duong, J. (2013). *Combustion visualization in a large bore gas engine*. Lund university.
- E-On. (13. June 2013). *Press release*. Haettu 13. June 2015 osoitteesta E-On homepage: <http://www.eon.com/en/media/news/press-releases/2013/6/13/power-to-gas-unit-injects-hydrogen-into-natural-gas-system-for-f.html>

- Gao, M.;& Krishnamurthy, R. (2009). Hydrogen transmission in pipelines and storage in pressurized and cryogenic tanks. Teoksessa R. B. Gupta, *Hydrogen fuel: Production, transport, and storage* (ss. 341-379). CRC Press.
- Harrison, K. W. (January 2010). <http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/47302.pdf>.
Haettu 8. June 2015
- Hermanns, R. T. (2007). *Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures*. Technische Universiteit Eindhoven.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- Huang, Z. W. (2006). Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas–hydrogen blends under different ignition timings. *Fuel* 86, 381-387.
- Iacobazzi, A. C. (2007). *Use of blends of hydrogen and natural gas in urban vehicles in the transition towards an hydrogen economy*. researchgate.net.
- International Electrotechnical Commission. (2010). *IEC 60079-20-1*. International standard.
- International Energy Agency. (2014).
<http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2014/>. Hämtat från
<http://www.worldenergyoutlook.org/>:
http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2014/141112_WEO_FactSheets.pdf den 8 6 2015
- International Maritime Organization. (ei pvm). *Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13*.
Haettu 10. June 2015 osoitteesta imo.org:
<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-%28NOx%29-%E2%80%93Regulation-13.aspx>
- Kahraman, N. C. (2009). Investigation of combustion characteristics and emissions in a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends. *International journal of hydrogen energy* 34, 1026-1034.

- Li, H. K. (2004). Knock in spark ignition hydrogen engines. *International journal of hydrogen energy* 29, 859-865.
- Lim, G. L. (2014). Effect of ignition timing retard strategy on NO_x reduction in hydrogen-compressed natural gas blend engine with increased compression ratio. *International journal of hydrogen energy* 39, 2399-2408.
- Lin, S. (2009). Hydrogen production from coal. Teoksessa R. B. Gupta, *Hydrogen fuel: production, transport, and storage* (ss. 103-125). CRC Press.
- makingdifferent.com. (ei pvm). <http://www.makingdifferent.com/2-stroke-engine-and-4-stroke-engine/>. Haettu 8. June 2015
- Melaina, M. A. (2013). *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues*. NREL, national renewable energy laboratory.
- Nanthagopal, K. e. (2011). Hydrogen enriched compressed natural gas - a futuristic fuel for internal combustion engines. *Thermal science*, 1145-1154.
- Pant, K. K. (2009). Fundamentals and use of hydrogen as fuel. Teoksessa B. R. Gupta, *Hydrogen fuel: production, transport, and storage* (ss. 3-32). CRC press.
- Park, C. e. (2010). The influence of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas machine. *International journal of hydrogen energy* 36, 3739-3745.
- Park, C. e. (2013). Operating strategy for exhaust gas reduction and performance improvement in a heavy-duty hydrogen-natural gas blend engine. *Energy* 50, 262-269.
- Patil, K. R. (2010). Development of HCNG Blended Fuel Engine with Control of NO_x Emissions. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 87-95.
- Pikka, J. (2012). *FEASIBILITY OF HYDROGEN AS FUEL IN MEDIUM SPEED ENGINES*. UNIVERSITY OF VAASA.

- Rigas, F.;& Skalavounos, S. (2009). Hydrogen safety. Teoksessa R. B. Gupta, *Hydrogen fuel production, transport, and storage* (ss. 535-568). CRC Press.
- Shrestha, S. K. (1999). Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications. *International journal of hydrogen energy* 24, 577-586.
- Soundarrajan, P.;& Schweighardt, F. (2009). Hydrogen sensing and detection. Teoksessa R. B. Gupta, *Hydrogen fuel: production, transport, and storage* (ss. 495-534). CRC Press.
- van Blarigan, P. K. (1998). A hydrogen fuelled internal combustion engine designed for single speed/power operation. *Int. J. hydrogen energy* 23, 603-609.
- Verhelst, S.;& Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in energy and combustion science*, 490-527.
- Wang, J. H. (2010). Effect of hydrogen addition on early flame growth of lean burn natural gas-air mixtures. *International journal of hydrogen energy* 35, 7246-7252.
- Warnatz, J. M. (1999). *Combustion*. New York: Springer.
- Wärtsilä. (2008). *Performance course*. Unpublished.
- Wärtsilä environmental technologies. (2015). *Wärtsilä environmental product guide*. Vaasa: Wärtsilä ship power.
- Wärtsilä Power plants. (2013). *Wärtsilä 34SG Power plant product guide*. December.
- Wärtsilä Ship Power Technology. (2013). *Wärtsilä 34 DF product guide*. December.
- White, C. S. (2006). The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *International journal of hydrogen energy* 31, 1292-1305.
- Yu, G. L. (1986). Laminar flame speed of hydrocarbon + air mixtures with hydrogen addition. *COMBUSTION AND FLAME*, 339-347.